92-01220/

DRAFT

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CALCUL DE LA VALEUR U ET DU CGS GLOBAUX DES FENETRES

PRÉPARÉ POUR :

Direction de la technologie de l'efficacité énergétique
et des énergies de remplacement
Énergie, Mines et Ressources Canada
Contrat MAS N° 23216-9-9117
Ottawa (Ontario)
Novembre 1990

PRÉPARÉ PAR :

Enermodal Engineering Ltd.
368, rue Phillip, Unité 2
Waterloo (Ontario)
N2L 5J1
(519) 884-6421

AUTORITÉ SCIENTIFIQUE :

Mark Riley
Direction de la technologie de l'efficacité
énergétique et des énergies de remplacement
Énergie, Mines et Ressources Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E4

CITATION

Enermodal Engineering Ltd. Développement d'une méthode de calcul de la valeur U et du CGS globaux des fenêtres. Dossier MAS n° 23216-9-9117. Direction de la technologie de l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa (Ontario), 1990. (57 pp.)

Pour obtenir des exemplaires du présent rapport s'adresser à la :

Direction de la technologie de l'efficacité énergétique
et des énergies de remplacement
Énergie, Mines et Ressources Canada
580, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0E4

ou

Division de la bibliothèque et des services de
documentation
CANMET
Énergie, Mines et Ressources Canada
562, rue Booth
Ottawa (Ontario)
K1A 0G1

NOTE

Le présent rapport est diffusé à titre documentaire uniquement. Il ne traduit pas nécessairement l'opinion du gouvernement du Canada et ne constitue pas une recommendation d'aucun produit commercial ou d'aucune personne. Ni le Canada, ni ses ministres, agents, employés ou mandataires ne donnent de garantie à l'égard du présent rapport et n'assument aucune responsabilité liée au présent rapport.

Ce projet a été financé à une contribution du Bureau de recherche et développement énergétiques d'Énergie, Mines et Ressources Canada.

© Ministère des approvisionnements et Services Canada 1990
N° de catalogue M91-7/135-1990F
ISBN 0-662-97186-8

PREAMBLE

This work was carried out under contract for Energy, Mines and Resources Canada (EMR) as part of the CANMET High-Performance-Window Project. This project includes support for the development of window performance standards and labelling procedures.

Window thermal performance standards, under development by the Canadian Standard Association (CSA), include procedures for calculating total window performance from component simulation and tabulated values for a wide range of window types. Procedures are based on two EMR computer programs: VISION, supported by the University of Waterloo, provides thermal analysis of simulated glazing systems, and FRAME, developed and supported by Enermodal Engineering Ltd, is a graphical design tool for thermal analysis of window frames.

This report presents ongoing work for the CSA Subcommittee on Energy Evaluation of Windows and has been useful as input to the energy performance standard.

EMR, Ottawa
January 1991

PRÉAMBULE

Cette étude a été conduite sous contrat avec Énergie, mines et ressources Canada (EMR) dans le cadre du projet "Fenêtres performantes".de CANMET. La participation à l'établissement de normes et labels concernant l'efficacité thermique des fenêtres fait partie des objectifs de ce projet.

Des normes d'efficacité énergétique des fenêtres, qui sont actuellement établies par l'Association canadienne de normalisation (Acnor), offrent l'option de calculer l'efficacité de la fenêtre complète à partir d'une simulation des composantes de la fenêtre et de valeurs tabulées pour un large éventail de types de fenêtres. La méthode repose sur deux programmes d'ordinateur de EMR: VISION, de l'Université de Waterloo, qui permet l'étude thermique du vitrage simulé, et FRAME, de Enermodal Engineering Ltée, qui est un outil de conception graphique pour l'analyse thermique des cadres de fenêtres.

Ce rapport reflète les travaux en cours du sous-comité Acnor d'évaluation énergétique des fenêtres et joue un rôle important dans l'établissement d'une norme sur l'efficacité energétique des fenêtres.

EMR, Ottawa
Janvier 1991

RÉSUMÉ DE DIRECTION

Ce rapport établit une méthode de calcul de la valeur U et du coefficient de gain solaire relatifs aux fenêtres. Selon cette méthode, le calcul de ces deux paramètres repose sur l'évaluation de la valeur de leurs composantes, comprenant le centre du vitrage, la bordure du vitrage et le cadre. Ce rapport décrit une méthode de calcul à la main, et les équations et tables de données utilisées y sont présentées en détail. Les tables de données fournissent la valeur U et le coefficient de gain solaire relatifs au centre-du-vitrage pour un large éventail de vitrages, ainsi que la valeur U d'un grand nombre de cadres de fenêtres de types variés. La valeur U du bord du vitrage ainsi que le coefficient de gain solaire des cadres sont par contre calculés.

On examine dans ce rapport la précision des valeurs de l'efficacité énergétique des fenêtres telles que prédites par FRAME et VISION. La comparaison des résultats obtenus par mesure expérimentale au CNRC avec ceux simulés sur ordinateur par VISION/FRAME, pour un échantillon de treize fenêtres, montre une différence moyenne de l'efficacité de 2.4 %. L'analyse montre que les pertes de chaleur au niveau du cadre et en bordure du vitrage, calculées par FRAME, sont comparables à celle mesurées au CNRC, compte-tenu de l'incertitude expérimentale. Il semble donc raisonnable d'utiliser FRAME pour évaluer ces pertes de chaleur. On a utilisé FRAME pour établir une table de valeurs U pour le cadre de 79 fenêtres, couvrant ainsi un éventail de fenêtres typiquement utilisées en construction résidentielle.

Ce rapport se penche aussi sur l'impact sur le coefficient de gain solaire de facteurs tels que la température extérieure, le niveau d'ensoleillement, le coefficient de transfert de chaleur à la surface de la fenêtre et l'angle d'incidence solaire. On a montré que la variation du coefficient de gain solaire du centre du vitrage en fonction des trois premiers paramètres précédents ne se montait pas à un pour cent, et ceci pour une variation importante de ces paramètres. On a trouvé que le coefficient de gain solaire dépend de l'angle d'incidence solaire. En outre, l'utilisation d'une simple équation de calcul du facteur d'incidence sous angle non-droit permet, lorsque nécessaire, d'obtenir le coefficient de gain solaire.

On a étudié l'influence des pertes de chaleur par le cadre et la bordure du vitrage sur le coefficient de gain solaire de la fenêtre complète. La variation de ce coefficient est faible dans le cas des fenêtres à cadre en bois, et de moins de cinq pour cent dans le cas des fenêtres à cadre d'aluminium isolé ou non. Le calcul du coefficient de gain solaire du cadre peut être effectué de manière simple, en fonction de la valeur U du cadre.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION

2. EXACTITUDE DES LOGICIELS

   2.1 Méthodologie

   2.2 Performance simulée des fenêtres de l'Université Queen's

   2.3 Rendement thermique simulé de trois fenêtres haute performance

   2.4 Comparaison du rendement simulé et du rendement mesuré des fenêtres

3. DÉTERMINATION DE LA VALEUR U GLOBALE DE LA FENÊTRE

   3.1 Méthodologie

   3.2 Valeurs U au centre du vitrage

   3.3 Valeurs U du bord du vitrage

   3.4 Valeurs U du cadre

      3.4.1 Données explicatives

      3.4.2 Production des tableaux de valeurs U

      3.4.3 Comparaison avec les résultats existants

4. DÉTERMINATION DU CGS GLOBAL DES FENÊTRES

   4.1 Méthodologie

   4.2 CGS du centre du vitrage

      4.2.1 Effets des conditions climatiques

      4.2.2 Effet d'une incidence non perpendiculaire

      4.2.3 Tableau des CGS au centre du vitrage

   4.3 CGS du cadre et de la bordure du vitrage

5. MÉTHODE DE CALCUL MANUELLE POUR LA VALEUR U ET LE CGS GLOBAUX DES FENÊTRES

   5.1 Méthode

      5.1.1 Valeur U globale de la fenêtre

      5.1.2 CGS global de la fenêtre

   5.2 Exemples de calculs

      5.2.1 Exemple 1

      5.2.2 Exemple 2

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

   6.1 Conclusions

   6.2 Recommandations

7. OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

ANNEXE A : COUPES DE FENÊTRES UTILISÉES POUR LE PROJET DE RECHERCHE CANADO-AMÉRICAIN

ANNEXE B.1 : COUPES DE FENÊTRES FIXES

ANNEXE B.2 : COUPES DE FENÊTRES À CHARNIÈRES

ANNEXE B.3 : COUPES DE FENÊTRES COULISSANTES

ANNEXE B.4 : COUPES DE FENÊTRES COULISSANTES À CHÂSSIS SANS TRAVERSES

ANNEXE C : FEUILLE DE CALCUL DE LA VALEUR U ET DU CGS GLOBAUX DES FENÊTRES

LISTE DES TABLEAUX

1: Résultats des simulations de fenêtres à l'Université Queen's

2: Résultats de simulations de fenêtres haute performance

3: Valeurs U prédites et mesurées des fenêtres, en $W/(m^2*C)$

4: Valeurs U cadre-bordure prédites et mesurées $[W/(m^2*C)]$

5: Valeurs U au centre du vitrage calculées par VISION

6: Coefficients pour l'équation de valeur U du bord du vitrage

7: Comparaison des méthodes de normalisation des valeurs U de cadres de fenêtres fixes

8: Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres fixes

9: Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres à charnières

10: Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres coulissantes

11: Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres coulissantes à châssis sans traverse

12: Variation du CGS en fonction des conditions climatiques

13: Variation du CGS en fonction de l'angle d'incidence

14: CGS au centre du vitrage tels que calculés par VISION

15: CGS du cadre et de la bordure du vitrage pour un rayonnement solaire perpendiculaire à la fenêtre

16: CGS du cadre et de la bordure du vitrage pour un rayonnement solaire à 45 degrés par rapport au vitrage

17: Variation des CGS du cadre et de la bordure du vitrage avec un coefficient d'échange superficiel extérieur pour une fenêtre à cadre d'aluminium

LISTE DES FIGURES

1: Vue en coupe de la fenêtre Willmar

2: Vue en coupe de la fenêtre Loewen

3: Vue en coupe de la fenêtre Paramount

4: Vue en coupe de la fenêtre 1 de l'Université Queen's

5: Vue en coupe de la fenêtre 2 de l'Université Queen's

6: Vue en coupe de la fenêtre 3 de l'Université Queen's

7: Valeurs U cadre-bordure prédites et mesurées

8: Valeur U du bord du vitrage en fonction de celle du centre du vitrage

9: Valeurs U des cadres de fenêtre en bois

10: Valeurs U des cadres de fenêtre en aluminium

11: Valeurs U des cadres de fenêtre fixe

12: CGS d'un simple vitrage en fonction de l'angle d'incidence

13: Correction du CGS pour une incidence non perpendiculaire

14: Dimensions des fenêtres

15: Exemple de calcul 1

16: Exemple de calcul 2

1. INTRODUCTION

Les fenêtres ont un effet considérable sur la consommation d'énergie des bâtiments. Le bilan thermique d'une fenêtre s'obtient à l'aide de l'équation suivante :

$$Q_{net} = CGS * I_T - U_w (T_{bg} - T_a)$$

où CGS est le coefficient de gain solaire et inclut le rayonnement solaire transmis et celui qui est absorbé par les vitrages et pénètre à l'intérieur du bâtiment par conduction ou par rayonnement.

I_T est le rayonnement solaire incident sur la fenêtre

U_w est la valeur U de la fenêtre

T_{bg} est la température de l'air à l'intérieur du bâtiment

T_a est la température de l'air extérieur ambiant

L'évaluation de cet effet requiert la connaissance de deux caractéristiques de la fenêtre : sa valeur U et son coefficient de gain solaire (CGS). Le 1989 ASHRAE Handbook of Fundamentals est la source la plus consultée pour les caractéristiques de fenêtres. Bien que cet ouvrage fournisse une liste assez complète des valeurs U au centre du vitrage, il ne donne les valeurs U de la bordure du vitrage et du cadre que pour deux intercalaires et quatre types de cadres. Cette information est nettement insuffisante compte tenu de la variété des types de fenêtres disponibles sur le marché. Les études Enermodal [1987] et Arasteh [1989] fournissent des données plus complètes sur la valeur U des bordures de vitrage. Il n'existe pas encore de tableau complet des valeurs U des cadres. L'information disponible sur le CGS est encore plus fragmentaire : le manuel de l'ASHRAE ne fournit que quelques CGS pour les types de verre les plus courants et ne donne aucune indication du CGS global des fenêtres.

Des programmes informatiques peuvent être utilisés au lieu du manuel ASHRAE pour déterminer les valeurs U et les CGS globaux des fenêtres. Parmi ces logiciels, on peut nommer FRAME [Enermodal 1989], VISION [Université de Waterloo, 1989] et WINDOW [LBL, 1988]. Ces logiciels ont été conçu pour

servir aux programmes d'étiquetage des fenêtres établis par l'Association canadienne de normalisation et par le National Fenestration Rating Council des É.-U. Bien qu'ils soient utiles à déterminer les caractéristiques des fenêtre d'un fabricant donné, ces logiciels demandent beaucoup de temps et requièrent un opérateur spécialement formé. Les ingénieurs-conseils, les architectes et les preneurs de décisions ont besoin d'une méthode simple (manuelle) leur permettant de déterminer les caractéristiques thermiques globales des fenêtres.

Le présent rapport résume le développement d'une méthode manuelle de détermination des caractéristiques des fenêtres et fournit des exemples du mode d'utilisation. Cette méthode repose sur des tableaux et sur des équations simples fournissant les valeurs U et les CGS des éléments des fenêtres. Pour chaque caractéristique, la valeur globale de la fenêtre dans son ensemble est simplement la moyenne des valeurs des différents éléments pondérée en fonction de leur surface respective. Les valeurs U et les CGS au centre du vitrage ont été déterminés à l'aide du logiciel VISION. Le programme FRAME a servi à déterminer les valeurs U et les CGS des cadres et des bordures de vitrage. Le présent rapport contient également une analyse de l'exactitude des logiciels VISION et FRAME dans leur prévision de la valeur U globale des fenêtres.

2. EXACTITUDE DES LOGICIELS

2.1 Méthodologie

Pour qu'on puisse se fier aux tableaux et aux chiffres contenus dans le présent rapport, il a fallu vérifier l'exactitude des logiciels utilisés pour produire les données. L'une des meilleures façon d'évaluer l'exactitude d'un logiciel consiste à comparer les résultats de la simulation avec des résultats expérimentaux précis. L'appareil à plaque chaude gardée (APCG) de l'Université de Waterloo est l'un des meilleurs instruments de mesure du transfert thermique au centre du vitrage. Selon Wright [1990], l'exactitude des mesures de l'APCG serait de trois pour cent. L'appareil à boîte chaude gardée du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) est l'une des meilleures installations au monde pour la mesure du transfert thermique à travers une fenêtre entière. L'exactitude des résultats que cet appareil fournit serait de six pour cent [Elmahdy et Bowen, 1988]. Malheureusement, il n'existe pas d'installation d'essai précise ayant un mode opératoire reconnu pour la détermination du CGS. (Remarque : L'Université de Waterloo est en train d'élaborer une méthode pour la détermination expérimentale du CGS [Dubrous et Harrison, 1989]. Lorsque l'exactitude de cette installation aura été déterminée, on pourra la comparer aux méthodes de calcul.)

Différentes études ont été faites afin de comparer les simulations du logiciel VISION avec les résultats expérimentaux de l'APCG [Wright et Sullivan, 1987; Baker et al., 1989]. Les simulations et les résultats mesurés se comparaient avantageusement (l'écart était de cinq pour cent dans la plupart des cas) et nous ne nous attarderons donc pas davantage sur l'exactitude du logiciel VISION.

Le CNRC a testé 13 fenêtres dont les résultats ne sont pas confidentiels et dont la construction est décrite. Des simulations FRAME ont été faites sur ces treize fenêtres, dont sept (numérotées de 1 à 7) dans le cadre d'un projet de recherche canado-américain portant sur la performance des fenêtres. L'annexe A contient des vues en coupe des cadres et les détails des simulations sont décrits dans Elmahdy [1990]. Trois autres fenêtres ont été simulées dans le cadre d'une étude de l'Université Queen's sur la performance

des fenêtres [Dubrous et Harrison, 1989] et les trois dernières ont été simulées à l'appui de l'étude Flair Homes sur les fenêtres à haut rendement [Ortech, 1989].

Les simulations pour toutes les fenêtres, à l'exception de celles de l'Université Queen's, ont été faites "à l'aveugle", c'est-à-dire que les résultats du CNRC n'ont pas été divulgués avant que les résultats des simulations soient publiés. Les résultats de simulation des six fenêtres qui n'ont pas encore été rapportés sont fournis aux sections 2.2 et 2.3.

2.2 Performance simulée des fenêtres de l'Université Queen's

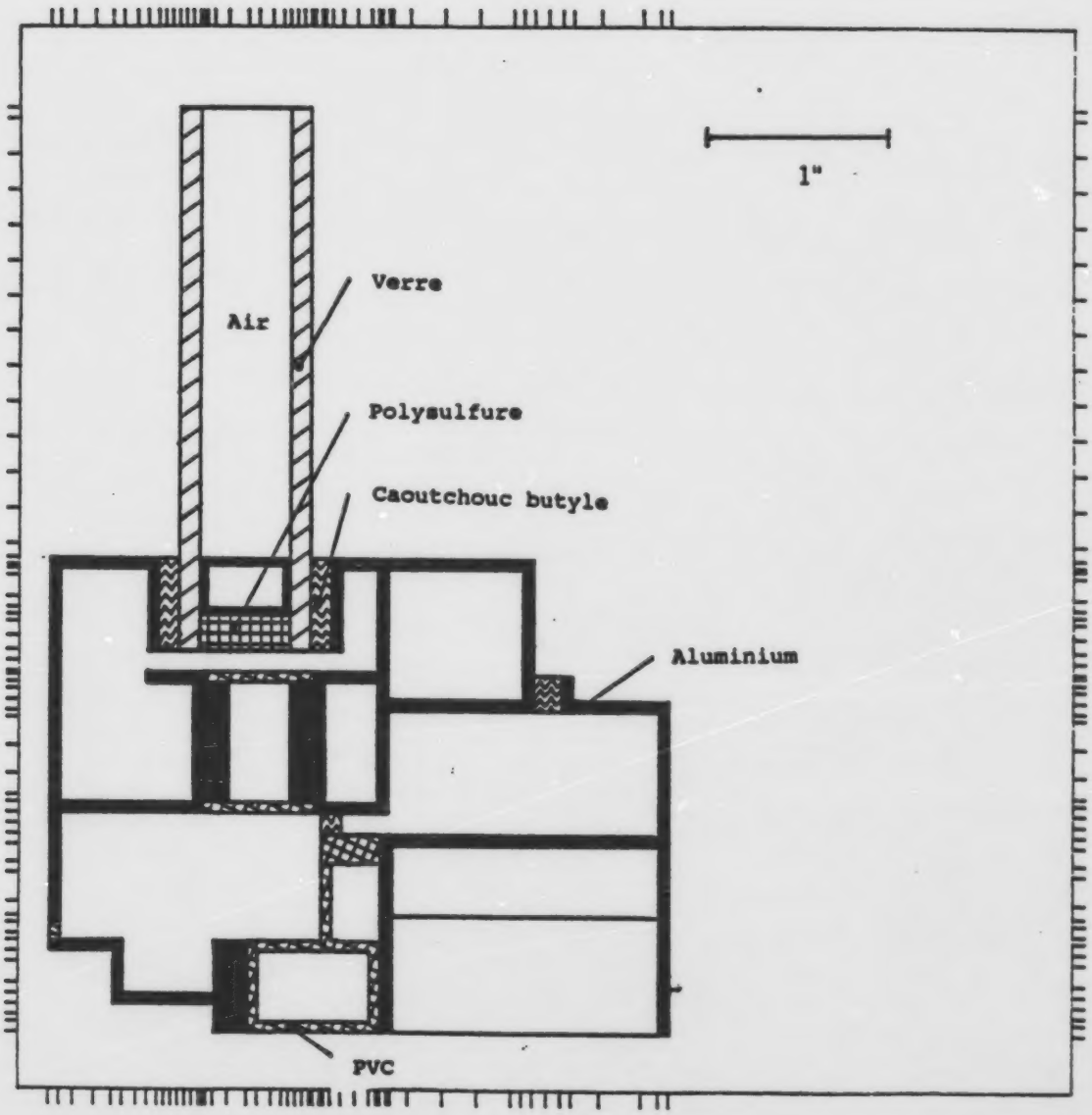
Le laboratoire de calorimétrie solaire de l'Université Queen's a fait tester trois fenêtres par le CNRC dans le cadre de l'évaluation de leur méthode de détermination du rendement thermique des fenêtres. Le rendement thermique de ces fenêtres avait été simulé avec une version antérieure (1.2) du logiciel FRAME. Le nombre maximal de rectangles utilisés pour dessiner le cadre des fenêtres a été limité à 40; il a donc fallu simplifier considérablement le profil des cadres pour la simulation. Un léger malentendu concernant le mode de fonctionnement du logiciel a été à l'origine de quelques écarts mineurs qui auraient faussé les résultats et l'évaluation d'exactitude du logiciel. Il a été décidé de reprendre la simulation des fenêtres.

Les figures 1, 2 et 3 sont les représentations FRAME des trois fenêtres vues en coupe. Les dimensions physiques des fenêtres ont été relevées sur les dessins de chaque fabricant. Les valeurs utilisées pour les caractéristiques des matériaux (conductivités thermiques et valeurs optiques) étaient les valeurs par défaut des deux logiciels. Les fenêtres mises à l'essai sont décrites comme suit :

Fenêtre n° 8

- double vitrage avec lame d'air
- intercalaire d'aluminium à double joint
- cadre de fenêtre à battants en aluminium avec coupure thermique de 10 mm

FIGURE 1 : REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENÊTRE N° 8



Fenêtre n° 9

- double vitrage avec lame d'air
- intercalaire d'aluminium à double joint
- cadre de fenêtre à battants en bois massif (avec revêtement extérieur d'aluminium)

Fenêtre n° 10

- triple vitrage avec lame d'air et un enduit faible émissivité
- intercalaire d'aluminium à double joint
- cadre de fenêtre à battants en bois massif (avec revêtement extérieur d'aluminium)

L'émissivité de l'enduit faible E a été considérée de 0.09, comme recommandé par le fabricant.

FIGURE 1 : REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENÊTRE N° 9

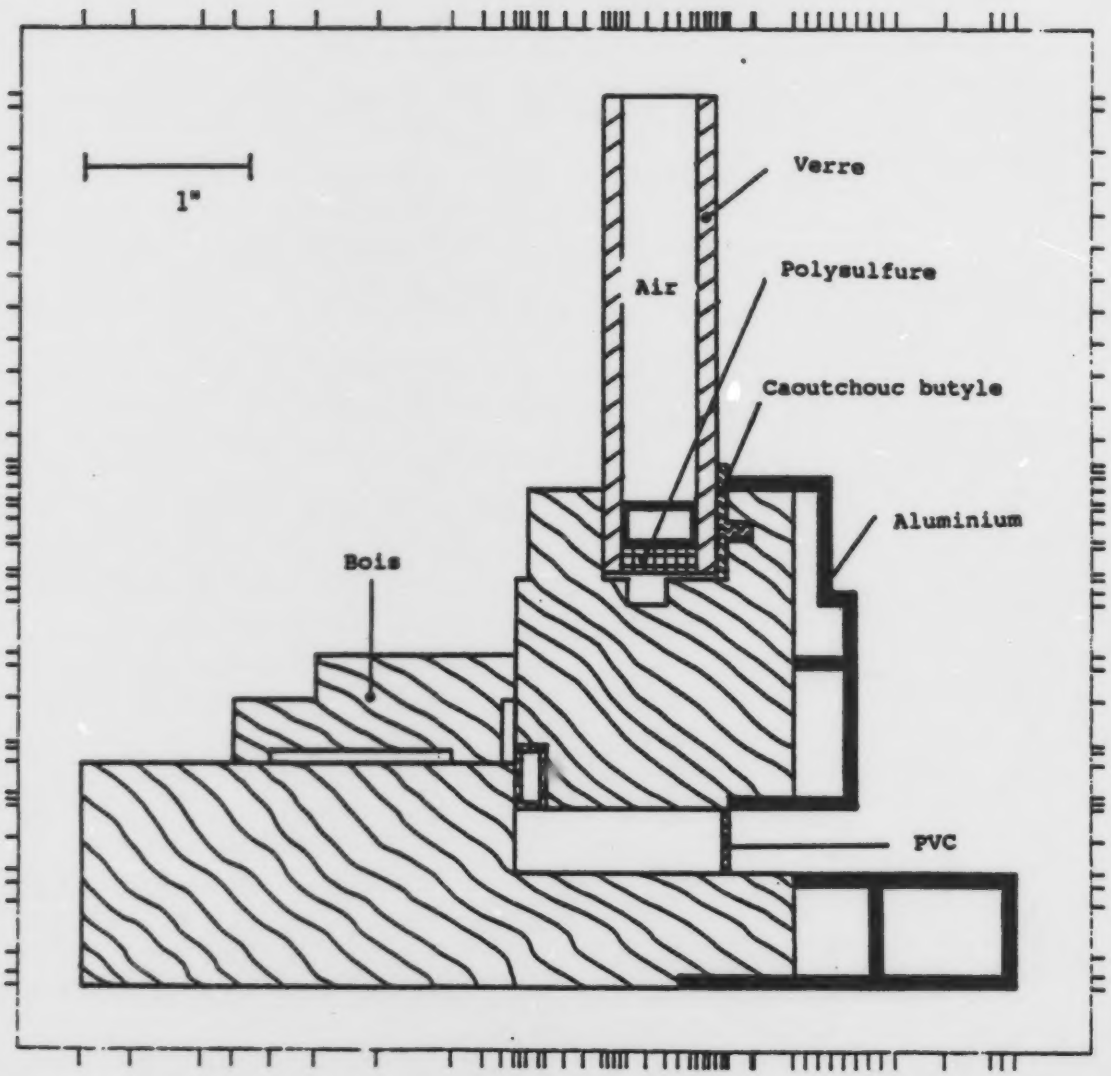
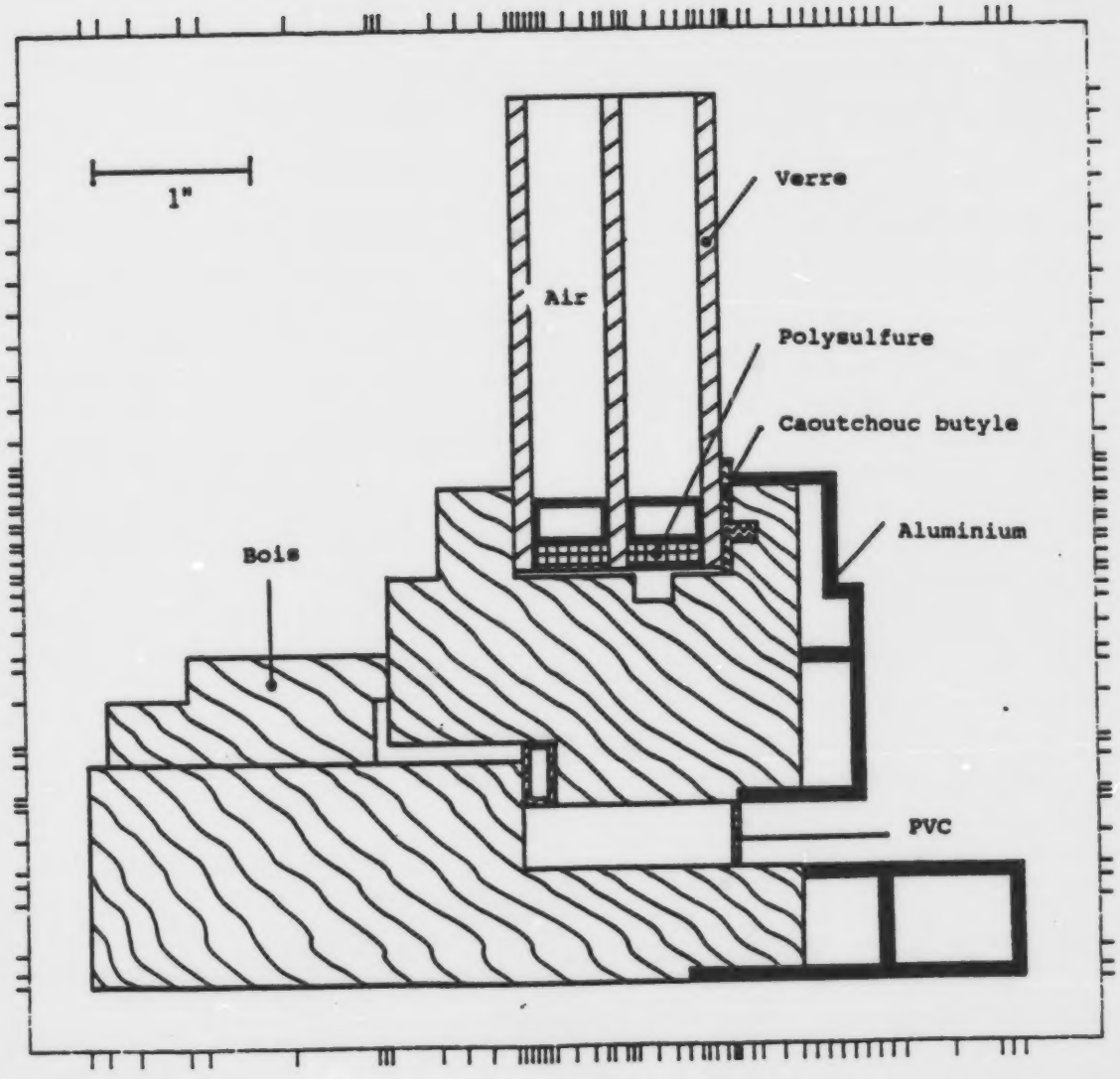


FIGURE 3 : REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENÊTRE N° 10



Les résultats des simulations sont résumés au tableau 1. Les valeurs U au centre du vitrage ont été déterminées à l'aide du logiciel VISION. Les valeurs U des cadres et en bordure du vitrage ont été déterminées à l'aide du logiciel FRAME. Les simulations ont été effectuées dans les conditions hivernales de calcul normalisées, c.-à-d. :

Extérieur :	T = -18 °C	Intérieur :	T = 21 °C
	h = 34.5 W/(m^2*C)		h = 7.5 W/(m^2*C)

Les valeurs U des fenêtres ont été rajustées en fonction des coefficients d'échange superficiel standard du CNRC, qui sont de 30 W/(m^2*C) à l'extérieur et de 8.3 W/(m^2*C) à l'intérieur, afin de permettre la comparaison des résultats de la simulation avec ceux des essais effectués au CNRC.

2.3 Rendement thermique simulé de trois fenêtres haute performance

Le rendement thermique de trois fenêtres conçues pour offrir une haute résistance thermique a été simulé à l'aide du logiciel FRAME, pour le transfert de chaleur par le cadre et par la bordure du vitrage, et au moyen du logiciel VISION, pour le transfert au centre du vitrage. Les figures 4, 5 et 6 sont les représentations FRAME des trois fenêtres vues en coupe. Les dimensions physiques des fenêtres sont celles obtenues de chaque fabricant. Les valeurs utilisées pour les caractéristiques des matériaux (conductivités thermiques et valeurs optiques) étaient les valeurs par défaut des deux logiciels. Notre compréhension des constructions de fenêtre est décrite ci-dessous. (Remarque : Une investigation a dû être entreprise pour élucider les données contradictoires sur les matériaux intercalaires, sur les enduits à faible émissivité et sur le remplissage à l'argon que contenaient les différents rapports d'essai et la documentation du fabricant.)

Fenêtre n° 11

- quadruple vitrage, dont deux carreaux intérieurs étant des pellicules Heat Mirror 88, cavités emplies d'air
- trois intercalaires en acier doux
- cadre en bois massif (pas de revêtement extérieur)

Tableau 1 : Résultats des simulations de fenêtres à l'Université Queen's

Fenêtre	8	9	10
Description	Double vitrage alum., coup. therm.	Double vitrage bois	Triple vitrage bois
U-centre [W/(m^2*C)]	2.75	2.87	1.34
U-bordure [W/(m^2*C)]	3.24	3.33	2.16
U-cadre [W/(m^2*C)]	4.68	2.40	2.09
U-global [W/(m^2*C)]	3.32	2.85	1.74
% vitrage	84.5	85.3	75.8

Les valeurs U incluent les coefficients d'échange superficiel standard du CNRC.

FIGURE 4 : REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENÊTRE N° 11

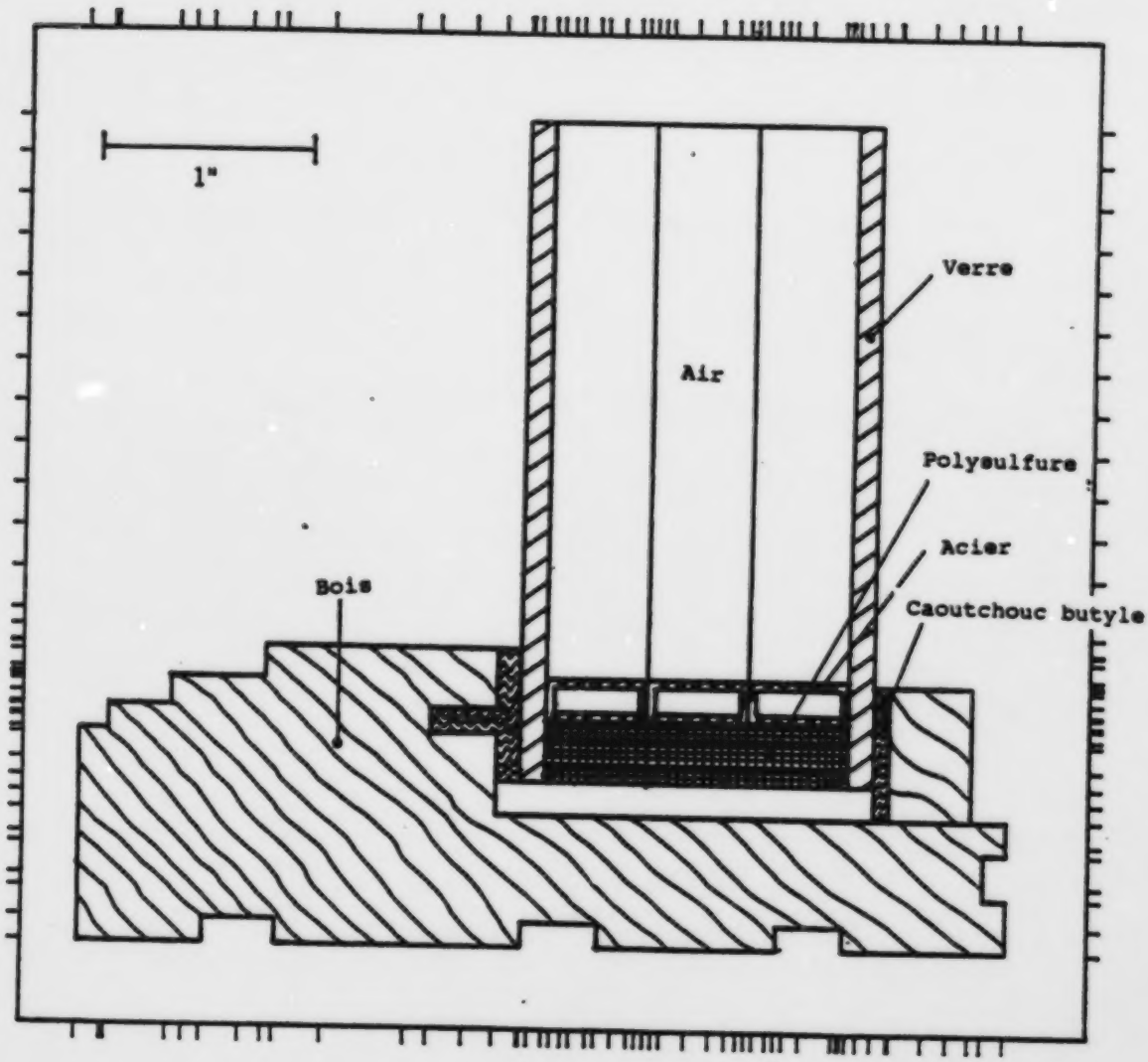


FIGURE 5 : REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENÊTRE N° 12

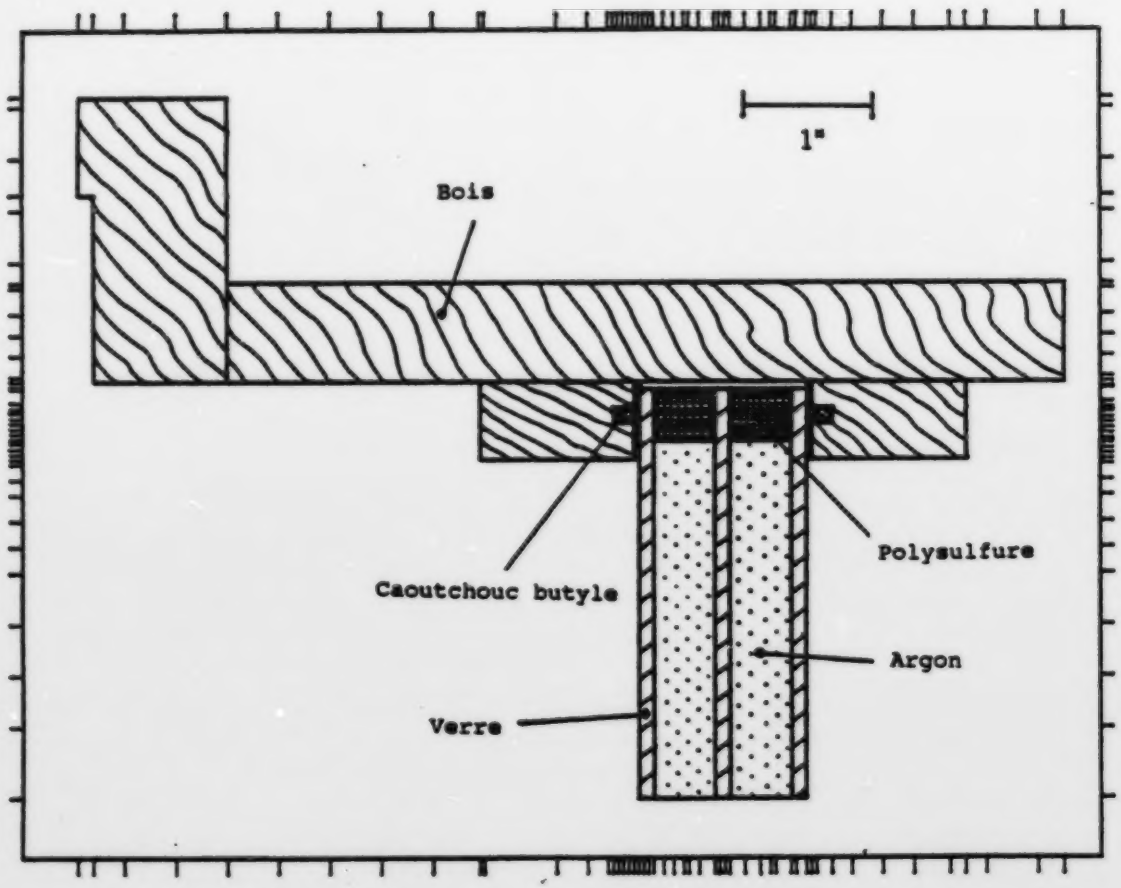
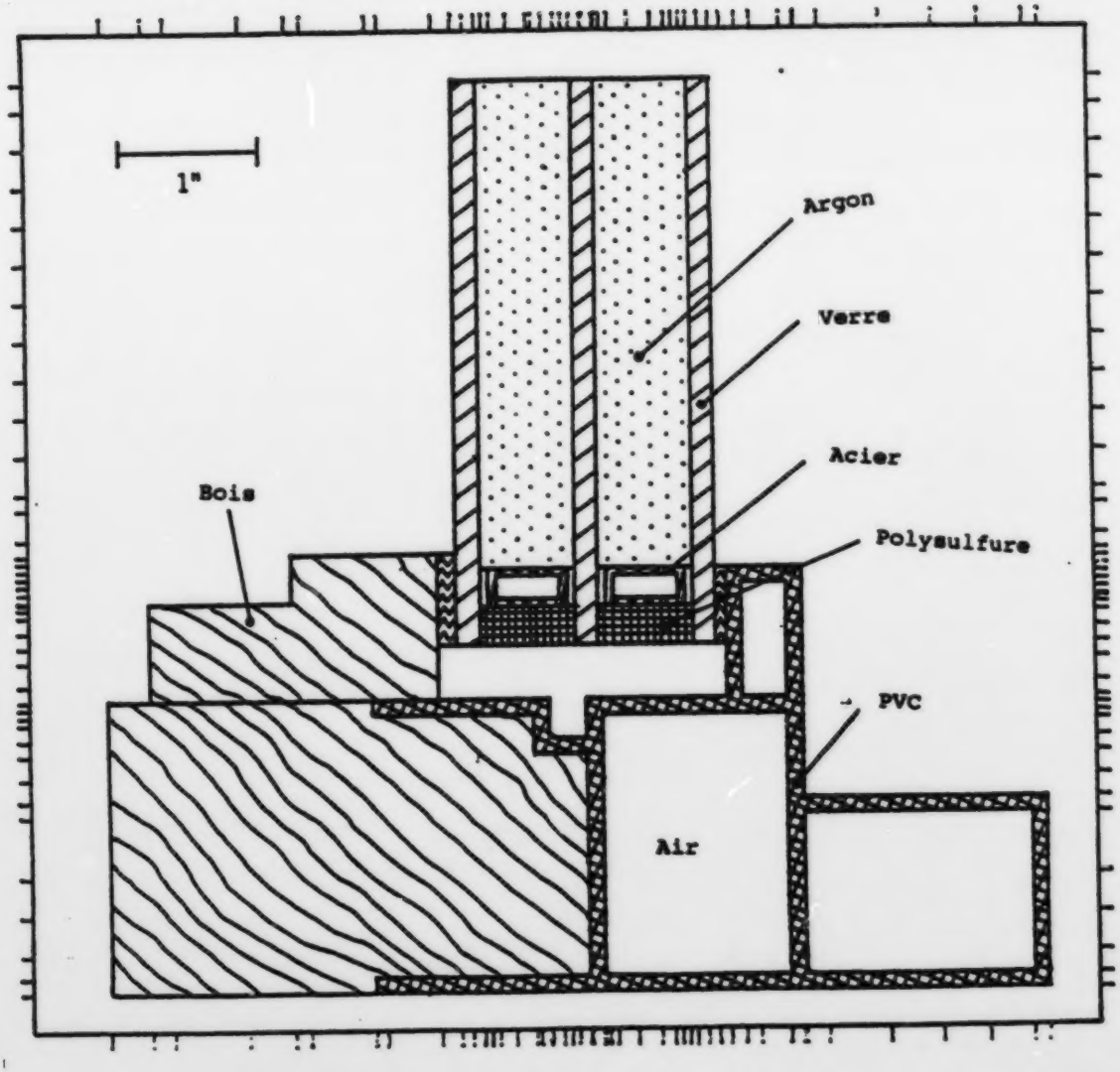


FIGURE 6 : REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENÊTRE N° 13



Fenêtre n° 12

- triple vitrage, avec deux enduits faible E et deux cavités emplies d'argon
- deux intercalaires Swiggle Strip
- cadre en bois massif (pas de revêtement extérieur)

Fenêtre n° 13

- triple vitrage, avec deux enduits faible E et deux cavités emplies d'argon
- deux intercalaires en acier doux à double joint
- cadre extérieur en PVC et cadre intérieur en bois.

L'émissivité des enduits faible E a été considérée de 0.09, comme recommandé par les fabricants.

Les résultats des simulations sont résumés au tableau 2. Les simulations ont été effectuées comme décrit à la section 2.2. Le CGS au centre du vitrage a été simulé à l'aide du logiciel VISION. Dans l'analyse de ces fenêtres, les effets du cadre et de la bordure du vitrage sur le coefficient d'ombrage des fenêtres ont été considérés faibles et ont donc été négligés.

2.4 Comparaison du rendement simulé et du rendement mesuré des fenêtres

Le tableau 3 permet de comparer les valeurs U mesurées par le CNRC et simulées par FRAME et par VISION. Le plus gros écart est de 5.9 % et l'écart moyen est de 2.4 %. Puisque la marge d'erreur de l'installation d'essai du CNRC est de 6 %, nous concluons que l'exactitude de la simulation informatique pour la valeur U globale de ces 13 fenêtres est au moins aussi bonne que celle des essais du CNRC. Quoi qu'il en soit, pour notre étude, c'est surtout la capacité du logiciel FRAME de prédire avec exactitude le transfert thermique par le cadre et par la bordure du vitrage qui nous intéresse. (Dans l'analyse qui suit, les déperditions calorifiques par le cadre et par la bordure du vitrage sont traitées ensemble parce que toutes deux sont prédites par le logiciel FRAME.)

La valeur U d'essai du cadre et de la bordure peut être déduite à partir des résultats d'essai du CNRC en utilisant la valeur U du centre du vitrage prédite par VISION :

(1)

où les indices fe, t et cg correspondent respectivement aux valeurs cadre-bordure, globale et centre du vitrage.

L'incertitude associée à cette méthode peut être calculée par une analyse statistique ordinaire. La marge d'erreur est calculée comme suit :

(2)

où E est l'erreur ou l'incertitude associée à chaque valeur.

Comme nous l'avons mentionné précédemment l'incertitude des valeurs U de la fenêtre dans son ensemble et du centre du vitrage est de 6 % et 3 % respectivement.

La figure 7 et le tableau 4 fournissent les valeurs U cadre-bordure mesurées lors d'essais et celles prédites au moyen de FRAME. L'incertitude des résultats des essais de cadres varie entre 9 et 17 %. Toutes les prédictions du logiciel FRAME se situent à l'intérieur des marges d'incertitude des résultats du CNRC.

Tableau 2 : Résultats de simulations de fenêtres haute performance

Fenêtre	11	12	13
Description	Quadruple vitrage bois	Triple vitrage bois	Triple vitrage bois/PVC
U-centre [W/(m²*C)]	0.88	0.83	0.81
U-bordure [W/(m²*C)]	1.95	1.20	1.52
U-cadre [W/(m²*C)]	2.77	1.76	1.82
U-global [W/(m²*C)]	1.41	1.06	1.22
% vitrage	34.5	35.3	7.58
Transmission solaire	34.0	28.3	25.2
CGS	0.43	0.42	0.37

Les valeurs U incluent les coefficients d'échange superficiel standard du CNRC.

Les CGS et la transmission solaire sont fondés sur la surface globale de la fenêtre.

Tableau 3 : Valeurs U prédites et mesurées des fenêtres, en W/(m²*C)

	Cadre de fenêtre	Vitrage	Essai CNRC	Prédict.	% d'écart entre prédict. et essai
1	Aluminium avec CT*-fixe	Double	3.55	3.37	-5.0
2	Bois - à battants	Double	2.70	2.80	3.7
3	Aluminium avec CT-fixe	Double	3.51	3.43	-2.3
4	Aluminium - fixe	Double	3.75	3.53	-5.9
5	Aluminium - fixe	Simple	6.85	6.61	-3.5
6	Aluminium avec CT-fixe	Dble-faible E	3.12	3.10	-0.6
7	Bois - à battants	Triple-faible E	1.45	1.44	-0.7
8	Aluminium avec CT-à bat.	Double	3.33	3.32	-0.3
9	Bois - à battants	Double	2.89	2.85	-1.4
10	Bois - à battants	Triple-faible E	1.76	1.74	-1.1
11	Bois - fixe	Triple-faible E	1.10	1.06	-3.5
12	PVC/Bois - fixe	Triple-faible E	1.22	1.22	-0.3
13	Bois - fixe	Double+2 HM	1.37	1.41	3.0
			Moyenne des valeurs absolues		2.4

*CT = coupure thermique

Figure 7 : Valeurs U cadre-bordure prédites et mesurées

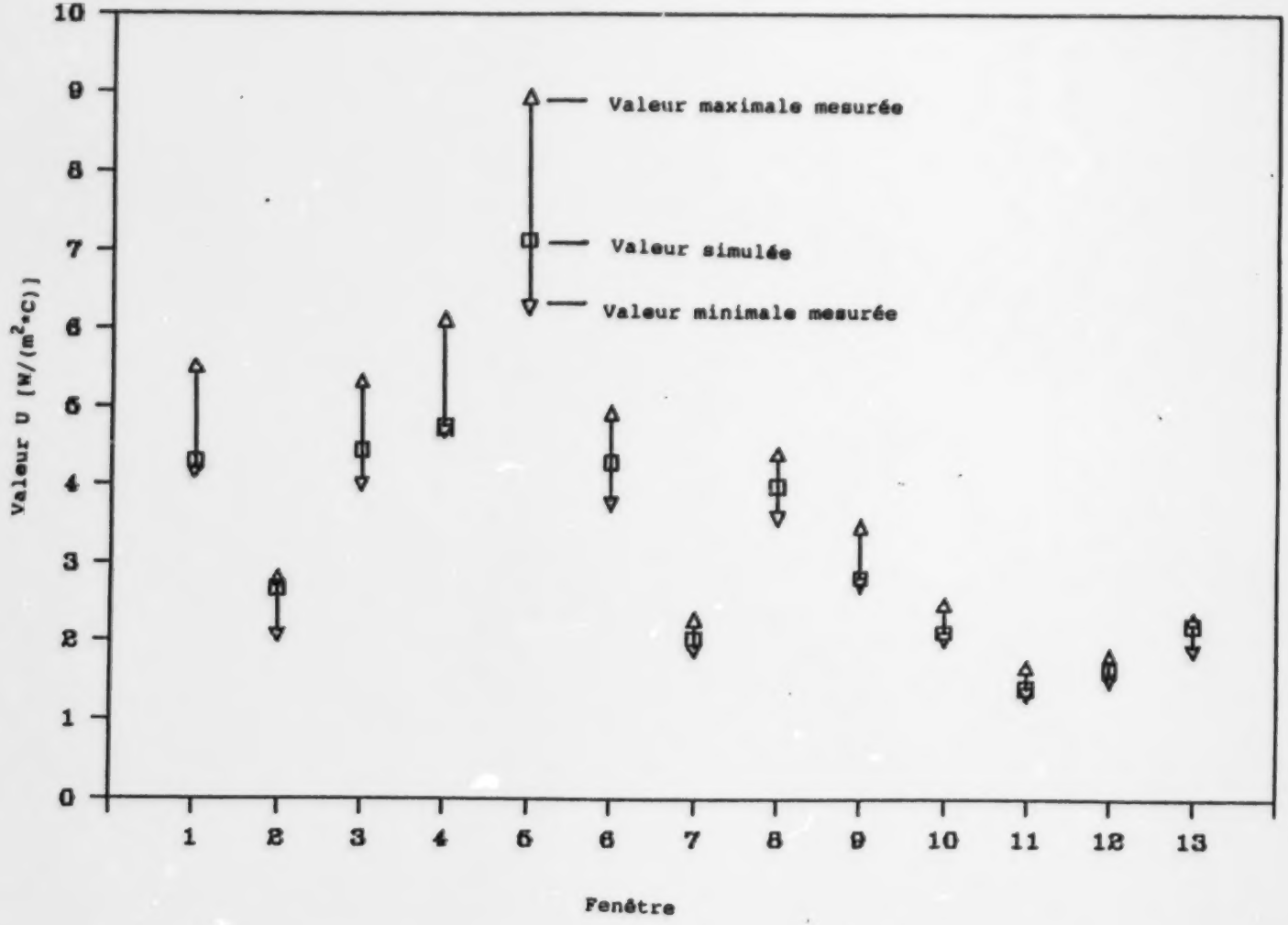


Tableau 4 : Valeurs U cadre-bordure prédites et mesurées [W/(m²*C)]

	Cadre de fenêtre	Vitrage	Résultat d'essai[1]	Incertitude[2] %	Marges d'incertitude Maximale	Minimale	Résultat prédit
1	Aluminium avec CT -fixe	Double	4.82	13.9	5.50	4.15	4.29
2	Bois - à battants	Double	2.43	14.9	2.80	2.07	2.67
3	Aluminium avec CT -fixe	Double	4.66	14.3	5.33	3.99	4.43
4	Aluminium - fixe	Double	5.40	13.3	6.11	4.68	4.74
5	Aluminium - fixe	Simple	7.60	17.5	8.93	6.27	7.12
6	Aluminium avec CT.-fixe	Dble-faible E	4.33	13.6	4.92	3.74	4.29
7	Bois - à battants	Triple-faible E	2.08	9.4	2.27	1.88	2.64
8	Alum. avec CT - à bat.	Double	3.98	10.5	4.40	3.56	3.98
9	Bois - à battants	Double	3.09	12.0	3.46	2.71	2.81
10	Bois - à battants	Triple-faible E	2.25	9.8	2.47	2.03	2.12
11	Bois - fixe	Triple-faible E	1.51	11.2	1.68	1.34	1.41
12	PVC/Bois - fixe	Triple-faible E	1.66	9.2	1.82	1.51	1.67
13	Bois - fixe	Double+2 HM	2.09	9.8	2.29	1.88	2.20

[1] Calculé au moyen de l'équation 1.

[2] Calculée au moyen de l'équation 2.

3. DÉTERMINATION DE LA VALEUR U GLOBALE DE LA FENÊTRE

3.1 Méthodologie

Selon le 1989 ASHRAE Handbook of Fundamentals, la valeur U globale de la fenêtre est la moyenne des valeurs U du centre du vitrage, de la bordure du vitrage et du cadre pondérée en fonction de leurs surfaces respectives. Le logiciel VISION permet de calculer la valeur U au centre du vitrage et le logiciel FRAME, ceux du cadre et de la bordure du vitrage.

La méthode couramment utilisée pour calculer la valeur U des différents éléments de fenêtres consiste à normaliser la perte de chaleur de chaque élément d'après sa surface projetée. Cette méthode est certainement appropriée pour le centre et la bordure du vitrage, mais ce n'est peut-être pas le meilleur moyen de normaliser la perte de chaleur par le cadre. La normalisation des pertes de chaleur par le cadre selon sa surface projetée, son aire de surface et son périmètre est analysée à la section 3.4.

Le logiciel VISION a été utilisé pour calculer les valeurs U au centre du vitrage pour différentes configurations de vitrage, les résultats sont fournis à la section 3.2. La valeur U de la bordure du vitrage a été établi par corrélation en fonction du type d'intercalaire et de la valeur U au centre du vitrage; la corrélation est énoncée à la section 3.3. Le logiciel FRAME a servi à modéliser un certain nombre de fenêtres disponibles sur le marché et les résultats sont analysés à la section 3.4.

3.2 Valeurs U au centre du vitrage

Le logiciel VISION a été utilisé pour calculer les valeurs U au centre du vitrage pour une vaste gamme de configurations de vitrage. Les systèmes de vitrage simulés incluaient des vitrages simples, doubles, triples et des doubles vitrages avec une ou deux pellicules Heat Mirror. Trois espacements de carreaux (c.-à-d. la distance entre chaque paire de vitrages ont été analysés : 6 mm, 9 mm et 13 mm. Les gaz de remplissage utilisés étaient soit l'air, soit l'argon. Les trois enduits faible E simulés avaient une émissivité de 0.09, 0.20 et 0.35. On a posé comme hypothèse que chaque

Tableau 5. Valeurs U du centre du vitrage calculées par VISION

SYSTÈME DE VITRAGE	VALEUR U [W/(m²•C)]
Single, Glass	5.74
Double, Glass	
6 mm air filled	3.24
9 mm air filled	2.96
13 mm air filled	2.82
6 mm argon filled	2.96
9 mm argon filled	2.73
13 mm argon filled	2.66
Double, Glass, e = 0.09 on one surface	
6 mm air filled	2.53
9 mm air filled	2.04
13 mm air filled	1.87
6 mm argon filled	2.05
9 mm argon filled	1.84
13 mm argon filled	1.58
Double, Glass, e = 0.20 on one surface	
6 mm air filled	2.67
9 mm air filled	2.23
13 mm air filled	2.07
6 mm argon filled	2.24
9 mm argon filled	1.87
13 mm argon filled	1.78
Double, Glass, e = 0.35 on one surface	
6 mm air filled	2.84
9 mm air filled	2.45
13 mm air filled	2.29
6 mm argon filled	2.48
9 mm argon filled	2.13
13 mm argon filled	2.05
Triple Glass	
6 mm air filled	2.28
9 mm air filled	1.99
13 mm air filled	1.82
6 mm argon filled	2.00
9 mm argon filled	1.78
13 mm argon filled	1.68
Triple Glass, e = 0.09 on one surface	
6 mm air filled	1.87
9 mm air filled	1.51
13 mm air filled	1.29
6 mm argon filled	1.52
9 mm argon filled	1.33
13 mm argon filled	1.09
Triple Glass, e = 0.20 on one surface	
6 mm air filled	1.98
9 mm air filled	1.62
13 mm air filled	1.41
6 mm argon filled	1.63
9 mm argon filled	1.36
13 mm argon filled	1.23
Triple Glass, e = 0.35 on one surface	
6 mm air filled	2.06
9 mm air filled	1.74
13 mm air filled	1.54
6 mm argon filled	1.75
9 mm argon filled	1.50
13 mm argon filled	1.37

SYSTÈME DE VITRAGE	VALEUR U [W/(m²•C)]
Triple Glass, e = 0.09 on two surfaces	
6 mm air filled	1.62
9 mm air filled	1.23
13 mm air filled	1.00
6 mm argon filled	1.24
9 mm argon filled	0.94
13 mm argon filled	0.79
Triple Glass, e = 0.20 on two surfaces	
6 mm air filled	1.74
9 mm air filled	1.36
13 mm air filled	1.16
6 mm argon filled	1.39
9 mm argon filled	1.11
13 mm argon filled	0.96
Triple Glass, e = 0.35 on two surfaces	
6 mm air filled	1.89
9 mm air filled	1.55
13 mm air filled	1.35
6 mm argon filled	1.56
9 mm argon filled	1.30
13 mm argon filled	1.17
Double Glass, one Heat Mirror^{TM} 66 film	
6 mm air filled	1.80
9 mm air filled	1.43
13 mm air filled	1.21
6 mm argon filled	1.44
9 mm argon filled	1.14
13 mm argon filled	1.01
Double Glass, one Heat Mirror^{TM} 66 film	
6 mm air filled	1.66
9 mm air filled	1.51
13 mm air filled	1.29
6 mm argon filled	1.52
9 mm argon filled	1.24
13 mm argon filled	1.10
Double Glass, two Heat Mirror^{TM} 66 films	
6 mm air filled	1.40
9 mm air filled	1.11
13 mm air filled	0.92
6 mm argon filled	1.12
9 mm argon filled	0.86
13 mm argon filled	0.76
Double Glass, two Heat Mirror^{TM} 66 films	
6 mm air filled	1.42
9 mm air filled	1.14
13 mm air filled	0.95
6 mm argon filled	1.15
9 mm argon filled	0.92
13 mm argon filled	0.80

enduit à faible émissivité faisait face à un cavité emplie de gaz stagnant (c.-à-d. soit la face 2, soit la face 3 dans un double vitrage). Les deux pellicules Heat Mirror simulées étaient la Heat Mirror™ 66 et la Heat Mirror™ 88. Les valeurs U au centre du vitrage sont fournies au tableau 5.

3.3 Valeurs U de la bordure du vitrage

Le transfert de chaleur par la bordure du vitrage est bidimensionnel et sa détermination précise requiert une modélisation détaillée. À partir d'un modélisation bidimensionnelle détaillée, Arasteh [1989] a établi une corrélation simple permettant de calculer la valeur de la bordure du vitrage en fonction du type d'intercalaire et de la valeur U du centre du vitrage. Cette corrélation est la suivante :

$$U_{cg} = A + B * U_{cg} + C * U_{cg}^2 \qquad (3)$$

où A, B et C sont des constantes de corrélation.

Le tableau 6 fournit les constantes de corrélation pour des intercalaires métalliques, isolants (y compris en bois) et de verre fondu et pour une combinaison d'intercalaires métallique et isolant. Les constantes de corrélation pour cette dernière combinaison ont été dérivées de simulations FRAME antérieures qui indiquaient que 85 % de la valeur U assurée par les intercalaires isolants dans les triples vitrages était attribuable au premier de ces intercalaires. L'équation est exprimée graphiquement à la figure 8.

3.4 Valeurs U du cadre

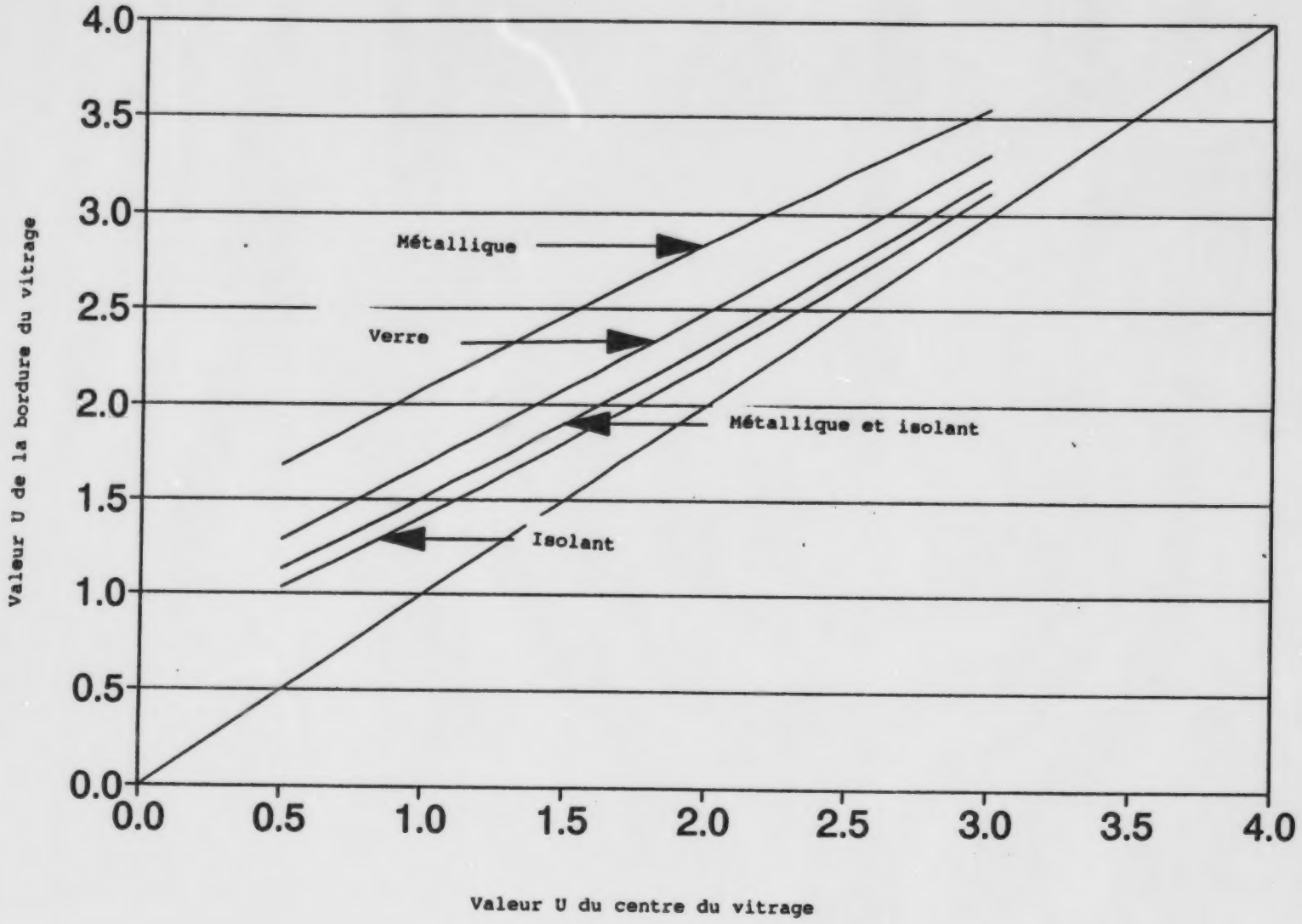
3.4.1 Données explicatives

Comme nous l'avons mentionné à la section 1, il est nécessaire de dresser un tableau des valeurs U du cadre pour pouvoir utiliser une méthode manuelle d'estimation des déperditions calorifiques par les fenêtres. Il a été démontré à la section 2 que le logiciel FRAME peut fournir des estimations raisonnables de la valeur U des cadres. Il nous reste à produire un tableau qui représente adéquatement l'éventail des fenêtres disponibles sur le marché.

Tableau 6. Coefficients pour l'équation de valeur U de la bordure du vitrage

Type d'intercalaire	A	B	C
Métallique	1.266	0.842	-0.027
Isolant	0.681	0.682	0.043
Verre	0.897	0.774	0.010
Métallique + isolant	0.769	0.706	0.033

FIGURE 8 : Valeur U de la bordure du vitrage en fonction de celle du centre du vitrage



Il existe, au Canada, des centaines de fabricants qui produisent des fenêtres dont la conception, le mode de fonctionnement, les matériaux et les dimensions sont très variés. Il ne serait pas pratique de déterminer les valeurs U de tous les cadres de fenêtres possibles; il faut plutôt diviser les milliers de modèles de cadres en groupes de construction similaire. La valeur U du cadre pour chaque groupe devrait être représentative de la fenêtre typique ou moyenne du groupe; il faut aussi se rappeler que les différents produits de chaque catégorie auront des valeurs U de cadre légèrement supérieures ou légèrement inférieures à celle de la fenêtre moyenne.

Hogan [1990] a catégorisé les résultats de 64 essais de mesure de valeur U de fenêtres et les a comparés aux valeurs données par le 1989 ASHRAE Handbook of Fundamentals. Bien qu'une partie des écarts de mesure soit sans doute imputable aux variantes et à la qualité des nombreux laboratoires d'essai, les résultats permettent de définir de grandes catégories de produits. Pour les fenêtres à cadre de bois, les fenêtres à guillotine avaient des valeurs U supérieures et les fenêtres à battants et fenêtres-auvents avaient des valeurs U inférieures à la valeur unique fournie par le manuel ASHRAE. Les fenêtres coulissantes et fixes avaient généralement des valeurs U proches de celle du manuel.

Le document de Hogan ne donnait pas suffisamment de données d'essais pour qu'on puisse établir des catégories pour les fenêtres de vinyle, d'aluminium et d'aluminium avec coupure thermique, mais des simulations antérieures peuvent servir de guide à cet égard. Enermodal [1990] a constaté que, dans la plupart des fenêtres, les pertes de chaleur par le cadre dépendent d'un seul élément ou "résistance principale" : seules les modifications à cet élément ont un effet important sur les pertes thermiques du cadre. Par exemple, la "résistance principale" dans les murs de bâtiments est l'isolant; les modifications au revêtement extérieur de briques ou à la cloison sèche intérieure ont peu d'effet sur les pertes de chaleur du mur.

Pour les fenêtres à cadre d'aluminium avec coupure thermique, la résistance de la coupure thermique est d'une importance primordiale dans la détermination des pertes de chaleur par le cadre. Les modifications aux parties en aluminium du cadre n'avaient presque aucun effet sur les pertes

thermiques. Dans le cas des fenêtres à cadre d'aluminium, le coefficient d'échange superficiel intérieur assure presque la totalité de la résistance à l'écoulement thermique. Les cadres de vinyle et de bois sont les résistances principales de leurs fenêtres respectives. Donc, les cadres de fenêtre devraient être répartis en catégories de résistance principale équivalente (c.-à-d. par longueurs égales d'élément constituant la résistance principale). Pour les fenêtres d'aluminium avec coupure thermique, la longueur est la plus courte distance de traversée de la coupure thermique. Pour les fenêtres de vinyle et de bois, cette longueur est la plus courte distance entre les conditions intérieures et extérieures (cette distance dépend de l'épaisseur du vitrage scellé).

La conception de l'intercalaire peut aussi avoir un effet considérable sur les pertes de chaleur par le cadre de toutes les fenêtres, saufs celles à cadre d'aluminium [Carpenter et McGowan, 1989]. Les matériaux d'intercalaire peuvent être divisés en deux groupes : métalliques et non métalliques (c.-à-d. haute conductivité et faible conductivité).

En résumé, les valeurs U des cadres dépendent

- du matériau (bois, vinyle, aluminium ou une combinaison de ces matériaux)
- du mode d'ouverture (fenêtres fixes, à battants, à auvent, à guillotine (à un ou deux châssis mobiles) et coulissantes)
- de l'intercalaire (métallique ou non-métallique)

Nous avons utilisé ces paramètres pour catégoriser les valeurs U des cadres.

Pour qu'un tableau des valeurs U des cadres puisse être appliqué de façon universelle, il est important que les pertes de chaleur par les cadres soient normalisées grâce au facteur approprié. Les valeurs U mentionnées dans le ASHRAE Handbook sont basées sur la surface projetée du cadre (c.-à-d. perpendiculairement au sens d'écoulement thermique). L'hypothèse a été avancée que dans certains cas des résultats plus cohérents seraient obtenus si on normalisait les pertes de chaleur par le cadre en fonction de son aire de surface ou de la longueur de son périmètre. Afin d'analyser cette hypothèse,

des cadres de fenêtre fixe de plusieurs fabricants ont été simulés et comparés à l'aide des trois méthodes de normalisation. Les résultats sont présentés au tableau 7.

L'analyse du tableau 7 nous permet de constater que, bien que l'écart de déperditions calorifiques entre des cadres de construction similaire puisse atteindre jusqu'à 50 %, la normalisation en fonction de la surface projetée produit les résultats les plus cohérents (cette méthode produit le plus petit coefficient de variation ou rapport de l'écart-type à la valeur moyenne). Toutefois, il est intéressant de noter que la normalisation par l'aire de surface est légèrement plus cohérente pour les fenêtres à cadre uniquement en aluminium. La différence n'est pas assez importante pour justifier l'emploi des deux méthodes de normalisation, mais elle démontre que les pertes de chaleur par les fenêtres en aluminium dépend de l'aire de surface, ce qui devrait être considéré dans l'évaluation (et dans la conception) des cadres d'aluminium. La surface projetée sera donc utilisée pour les valeurs U dans le présent rapport. Les résultats seront ainsi compatibles avec les résultats publiés dans d'autres sources [ASHRAE 1989, Hogan 1990, etc.].

3.4.2 Production des tableaux de valeurs U

Le logiciel **FRAME** a été utilisé pour générer les valeurs U des cadres pour les catégories mentionnées à l'article 3.4.1. Dans chaque cas, un plan en coupe du cadre a été obtenu d'un grand fabricant de fenêtres canadien jugé représentatif de la catégorie de fenêtres résidentielles visée. Quoi qu'il en soit, la valeur U du cadre d'un autre fabricant peut être supérieure ou inférieure aux valeurs indiquées dans le présent rapport. Les vues en coupe des fenêtres et les représentations obtenues à l'aide du logiciel **FRAME** sont jointes en annexe B.

Pour la plupart des cadres, il a fallu faire des représentations **FRAME** (en coupe) du seuil, de la traverse supérieure, d'un montant et de la traverse de battement. Au lieu de produire un grand tableau peu commode contenant toutes ces valeurs, nous avons combiné ces dernières en

Tableau 7 : Comparaison des méthodes de normalisation des valeurs U de cadres de fenêtres fixes

Cadre	Pertes de chaleur totales par le cadre (Watts)	Valeur U, normalisée selon surf. proj. [W/(m²*C)]	aire de surf. [W/(m²*C)]	périmètre [W/(m*C)]
Bois n° 1	19.09	2.70	0.64	0.12
Bois n° 2	17.13	2.77	1.05	0.11
Bois n° 3	15.77	2.70	0.59	0.10
Moyenne		2.72	0.76	0.11
Écart-type		0.03	0.27	0.008
É.-T./moyenne		0.01	0.27	0.07
Alum. avec CT n° 1	69.01	4.38	2.90	0.53
Alum. avec CT n° 2	46.09	4.46	2.54	0.32
Alum. avec CT n° 3	52.75	4.68	3.03	0.37
Moyenne		4.51	2.82	0.41
Écart-type		0.13	0.21	0.09
É.-T./moyenne		0.03	0.07	0.22
Aluminium n° 1	132.67	8.42	5.58	1.02
Aluminium n° 2	95.70	9.26	5.28	0.67
Aluminium n° 3	95.46	8.47	5.48	0.67
Moyenne		8.72	5.45	0.79
Écart-type		0.38	0.12	0.16
É.-T./moyenne		0.04	0.02	0.21

établissant que les dimensions extérieures de la fenêtre seraient de 900 x 1200 mm (Type R de l'ASHRAE). La valeur U combinée du cadre est applicable à toutes les fenêtres ayant à peu près le même rapport largeur-hauteur, quelles que soient leurs dimensions (toutefois l'aire du cadre et le pourcentage de l'aire totale occupée par le cadre varieront avec les dimensions).

Les fenêtres ont été classées dans l'une des quatre catégories suivantes selon leur mode de fonctionnement : fixes, à charnières (incluant les fenêtres-auvents, les fenêtres à soufflet et celles à battants, qui ont la plupart du temps le même profil que les fenêtres fixes), coulissantes (qui comprennent les fenêtres coulissant horizontalement et les fenêtres à guillotine à un ou à deux châssis mobiles) et les fenêtres coulissantes à châssis sans traverses. Les valeurs U de fenêtres de ces quatre catégories sont fournies aux tableaux 8, 9, 10 et 11. Ces tableaux indiquent également le pourcentage de cadre et les hauteurs de cadre équivalentes pour permettre la comparaison avec des fenêtres non comprises dans les tableaux. Les coefficients d'échange superficiel utilisés dans la modélisation des cadres ont été déterminés à l'aide du logiciel VISION dans les conditions hivernales de calcul de l'ASHRAE.

Les figures 9, 10 et 11 illustrent graphiquement certains des résultats présentés dans les tableaux. Pour les fenêtres analysées, les fenêtres coulissantes à châssis sans traverses et les fenêtres à charnières avaient des valeurs U inférieures aux fenêtres fixes et aux fenêtres coulissantes à vitrage scellé. Bien qu'au premier abord il semble surprenant que les cadres de fenêtre fixe aient une valeur U élevée, il faut se rappeler qu'ils ont la plus petite surface projetée et, par conséquent, la plus faible perte de chaleur globale. Les cadres de fibre de verre sont les plus résistants à l'écoulement thermique et les cadres d'aluminium avec et sans coupure thermique ont la plus faible résistance au passage de chaleur.

3.4.3 Comparaison avec les résultats existants

Il est difficile de comparer les valeurs de perte thermique par le cadre fournies par le ASHRAE Handbook aux résultats du présent rapport parce que les profils de cadre utilisés dans le manuel ASHRAE sont confidentiels. Nous avons listé ci-dessous l'étendue des valeurs U pour les types de cadres énumérés dans le manuel ASHRAE. Les valeurs de l'ASHRAE se situent à l'intérieur des gammes de valeurs U prédites à l'aide de FRAME.

	Aluminium	Alum. avec CT	Bois/Vinyle
ASHRAE	10.8	5.7	2.3
FRAME	7.18-12.94	3.59-9.27	2.03-3.56

Les valeurs U de cadres mentionnées dans l'étude de Hogan [1990] ne devraient pas être comparées avec les résultats du présent rapport, puisque les profils de cadre utilisés dans l'étude Hogan ne sont pas connus et puisque la méthode utilisée pour déduire les valeurs U de ses résultats ne conviennent pas en raison d'une trop grande marge d'erreur (12 % des valeurs U de cadre mentionnées dans ce document sont négatives). Les tendances qui ressortent du rapport Hogan [1990] sont les mêmes que celles décrites à l'article 3.4.2, les cadres de fenêtres à guillotine ont des valeurs U supérieures à la valeur de l'ASHRAE et les cadres des fenêtres-auvents et des fenêtres à battants ont des valeurs U inférieures. Par ailleurs, les fenêtres fixes et les fenêtres à châssis sans traverses ont généralement des valeurs U proches des valeurs de l'ASHRAE. Les valeurs U des cadres entièrement en aluminium varient grandement, en fonction de l'aire de surface globale du cadre.

Tableau 8 : Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres fixes

Frame Design	Thickness IG or TB[a]	Spacer Type	Percent Frame (%)[b]	Average Frame Height (mm)	U-Value [W/(m²*C)][c]
P1 Aluminum	36 mm	all	11.3	29.9	7.18[d]
P2 Aluminum	104 mm	all	13.0	34.5	12.94
P3 Aluminum with T.B.	5 mm	alum.	13.0	34.5	9.27
P3 Aluminum with T.B.	5 mm	ins.	13.0	34.5	7.82
P4 Aluminum with T.B.	9 mm	alum.	9.5	25.0	6.58
P4 Aluminum with T.B.	9 mm	ins.	9.5	25.0	5.20
P5 Aluminum with T.B.	33 mm	alum.	14.4	38.4	5.06
P5 Aluminum with T.B.	33 mm	ins.	14.4	38.4	3.77
P6 Fiberglass	18 mm	alum.	17.1	46.0	2.31
P6 Fiberglass	18 mm	ins.	17.1	46.0	2.06
P7 Fiberglass	34 mm	alum.	17.1	46.0	1.98
P7 Fiberglass	34 mm	ins.	17.1	46.0	1.58
P8 Vinyl	18 mm	alum.	16.0	42.9	2.48
P8 Vinyl	18 mm	ins.	16.0	42.9	2.10
P9 Vinyl	34 mm	alum.	16.0	42.9	2.51
P9 Vinyl	34 mm	ins.	16.0	42.9	1.87
P10 Vinyl-Rein.	18 mm	alum.	16.0	42.9	2.95
P10 Vinyl-Rein.	18 mm	ins.	16.0	42.9	2.57
P11 Vinyl-Rein.	34 mm	alum.	16.0	42.9	2.81
P11 Vinyl-Rein.	34 mm	ins.	16.0	42.9	2.25
P12 Wood	18 mm	alum.	14.7	39.3	2.78
P12 Wood	18 mm	ins.	14.7	39.3	2.37
P13 Wood	34 mm	alum.	14.7	39.3	2.55
P13 Wood	34 mm	ins.	14.7	39.3	1.88
P14 Wood-Al Clad	18 mm	alum.	14.7	39.3	2.96
P14 Wood-Al Clad	18 mm	ins.	14.7	39.3	2.46
P15 Wood-Al Clad	34 mm	alum.	14.7	39.3	2.68
P15 Wood-Al Clad	34 mm	ins.	14.7	39.3	1.96

Remarques :

a. Le terme "épaisseur" désigne la dimension perpendiculaire au plan de la fenêtre et est soit l'épaisseur du vitrage scellé (pour les cadres non métalliques), soit la longueur de la coupure thermique (dans le cas des cadres d'aluminium avec CT), soit l'épaisseur du cadre parallèlement à l'écoulement thermique (dans le cas des cadres tout en aluminium).

b. Le "pourcentage de cadre" est calculé d'après une fenêtre résidentielle ordinaire de 900 x 1200 mm.

c. Toutes les valeurs U ont été produites à partir des conditions hivernales de calcul de l'ASHRAE :
Temp. ext. = -18 °C, coefficient d'échange superficiel = 34.48 W/(m^2*C)
Temp. int. = 21 °C, coefficient d'échange superficiel = 7.58 W/(m^2*C)

d. Les valeurs U des fenêtres à cadre tout en aluminium sont très variables en fonction du modèle du cadre et surtout en fonction de l'aire de surface globale du cadre.

Tableau 9 : Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres à charnières

Frame Design	Thickness IG or TB[a]	Spacer Type	Percent Frame (%)[b]	Average Frame Height (mm)	U-Value [W/(m²*C)][c]
H1 Aluminum	-	all	22.9	62.6	12.03[d]
H2 Aluminum with T.B.	5 mm	alum.	37.4	107.1	4.38
H2 Aluminum with T.B.	5 mm	ins.	37.4	107.1	4.24
H3 Aluminum with T.B.	9 mm	alum.	24.6	67.6	4.10
H3 Aluminum with T.B.	9 mm	ins.	24.6	67.6	3.60
H4 Aluminum with T.B.	18 mm	alum.	26.2	72.4	3.59
H4 Aluminum with T.B.	18 mm	ins.	26.2	72.4	3.39
H5 Fiberglass	18 mm	alum	25.4	70.0	2.47
H5 Fiberglass	18 mm	ins.	25.4	70.0	2.17
H6 Vinyl	18 mm	alum.	25.1	69.1	2.03
H6 Vinyl	18 mm	ins.	25.1	69.1	1.78
H7 Vinyl	34 mm	alum.	25.1	69.1	1.87
H7 Vinyl	34 mm	ins.	25.1	69.1	1.53
H8 Vinyl-Rein.	18 mm	alum.	25.1	69.1	2.35
H8 Vinyl-Rein.	18 mm	ins.	25.1	69.1	2.11
H9 Vinyl-Rein.	34 mm	alum.	25.1	69.1	2.16
H9 Vinyl-Rein.	34 mm	ins.	25.1	69.1	1.84
H10 Wood	18 mm	alum.	28.1	78.1	2.33
H10 Wood	18 mm	ins.	28.1	78.1	2.09
H11 Wood	34 mm	alum.	28.1	78.1	2.03
H11 Wood	34 mm	ins.	28.1	78.1	1.66
H12 Wood-Al Clad	18 mm	alum.	28.1	78.1	2.36
H12 Wood-Al Clad	18 mm	ins.	28.1	78.1	2.10
H13 Wood-Al Clad	34 mm	alum.	28.1	78.1	2.08
H13 Wood-Al Clad	34 mm	ins.	28.1	78.1	1.69

Remarques :

a. Le terme "épaisseur" désigne la dimension perpendiculaire au plan de la fenêtre et est soit l'épaisseur du vitrage scellé (pour les cadres non métalliques), soit la longueur de la coupure thermique (dans le cas des cadres d'aluminium avec CT), soit l'épaisseur du cadre parallèlement à l'écoulement thermique (dans le cas des cadres tout en aluminium).

b. Le "pourcentage de cadre" est calculé d'après une fenêtre résidentielle ordinaire de 900 x 1200 mm.

c. Toutes les valeurs U ont été produites à partir des conditions hivernales de calcul de l'ASHRAE :
Temp. ext. = -18 °C, coefficient d'échange superficiel = 34.48 W/(m²*C)
Temp. int. = 21 °C, coefficient d'échange superficiel = 7.58 W/(m²*C)

d. Les valeurs U des fenêtres à cadre tout en aluminium sont très variables en fonction du modèle du cadre et surtout en fonction de l'aire de surface globale du cadre.

Tableau 10 : Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres coulissantes

Frame Design	Thickness IG or TB[a]	Spacer Type	Percent Frame (%)[b]	Average Frame Height (mm)	U-Value [W/(m²*C)][c]
S1 Aluminum	-	all	25.0	48.1	14.36[d]
S2 Aluminum with T.B.	20 mm	alum.	24.0	46.0	5.35
S2 Aluminum with T.B.	20 mm	ins.	24.0	46.0	4.87
S3 Fiberglass[e]	18 mm	alum	33.6	66.3	2.53
S3 Fiberglass[e]	18 mm	ins.	33.6	66.3	2.24
S4 Vinyl	18 mm	alum.	31.8	62.4	3.29
S4 Vinyl	18 mm	ins.	31.8	62.4	2.92
S4 Vinyl-Rein.	18 mm	alum.	31.8	62.4	3.56
S4 Vinyl-Rein.	18 mm	ins.	31.8	62.4	3.21
S5 Wood	18 mm	alum.	29.9	58.4	3.38
S5 Wood	18 mm	ins.	29.9	58.4	3.06
S6 Wood	34 mm	alum.	29.9	58.4	3.07
S6 Wood	34 mm	ins.	29.9	58.4	2.55
S7 Wood-Al Clad	18 mm	alum.	29.9	58.4	3.55
S7 Wood-Al Clad	18 mm	ins.	29.9	58.4	3.16
S8 Wood-Al Clad	34 mm	alum.	29.9	58.4	3.25
S8 Wood-Al Clad	34 mm	ins.	29.9	58.4	2.65

Tableau 11 : Valeurs U de cadres calculées par FRAME - Fenêtres coulissantes à châssis sans traverses

Frame Design	Thickness IG or TB[a]	Percent Frame (%)[b]	Average Frame Height (mm)	U-Value [W/(m²*C)][c]
S9 Aluminum	-	31.7	62.2	7.10[d]
S9 Aluminum with T.B.	10 mm	31.7	62.2	4.76
S10 Aluminum with T.B.	33 mm	24.1	46.2	3.82
S11 Aluminum with T.B.	50 mm	18.1	34.1	3.68
S12 Fiberglass	18 mm	23.7	45.4	3.28
S13 Wood/PVC	18 mm	16.9	31.8	2.02
S14 Wood/PVC	34 mm	16.9	31.8	1.19
S15 Wood/PVC-Al Clad	18 mm	16.9	31.8	2.04
S16 Wood/PVC-Al Clad	34 mm	16.9	31.8	1.21

Remarques :

a. Le terme "épaisseur" désigne la dimension perpendiculaire au plan de la fenêtre et est soit l'épaisseur du vitrage scellé (pour les cadres non métalliques), soit la longueur de la coupure thermique (dans le cas des cadres d'aluminium avec CT), soit l'épaisseur du cadre parallèlement à l'écoulement thermique (dans le cas des cadres tout en aluminium).

b. Le "pourcentage de cadre" est calculé d'après une fenêtre résidentielle ordinaire de 900 x 1200 mm.

c. Toutes les valeurs U ont été produites à partir des conditions hivernales de calcul de l'ASHRAE :
Temp. ext. = -18 °C, coefficient d'échange superficiel = 34.48 W/(m²*C)
Temp. int. = 21 °C, coefficient d'échange superficiel = 7.58 W/(m²*C)

d. Les valeurs U des fenêtres à cadre tout en aluminium sont très variables en fonction du modèle du cadre et surtout en fonction de l'aire de surface globale du cadre.

e. Creux des cadres empli de fibre de verre.

Figure 9 Cadres de fenêtre en bois
(Double vitrage)

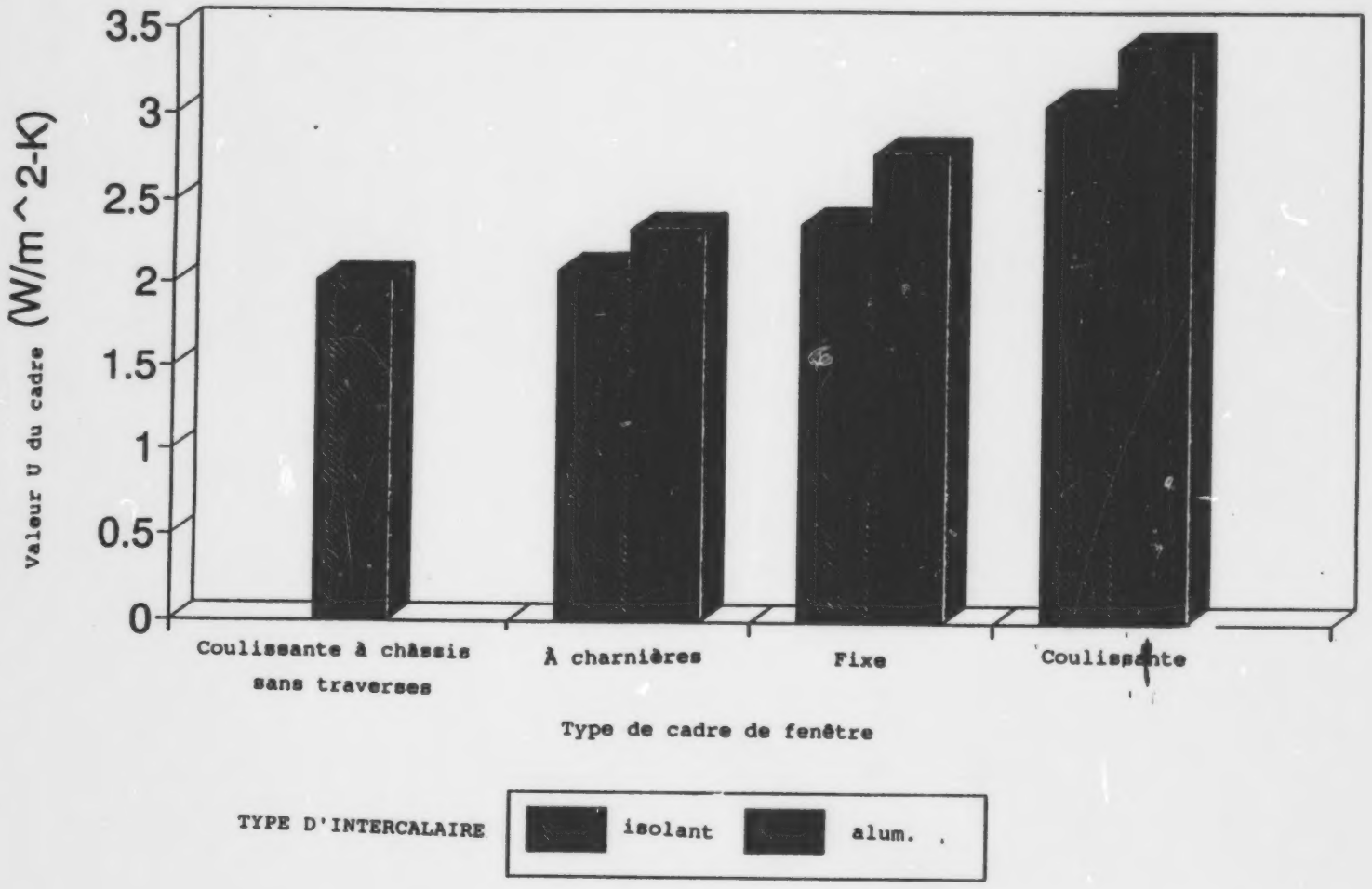


Figure 10 Cadres de fenêtre en aluminium
(Double vitrage - coupure thermique de 10 mm)

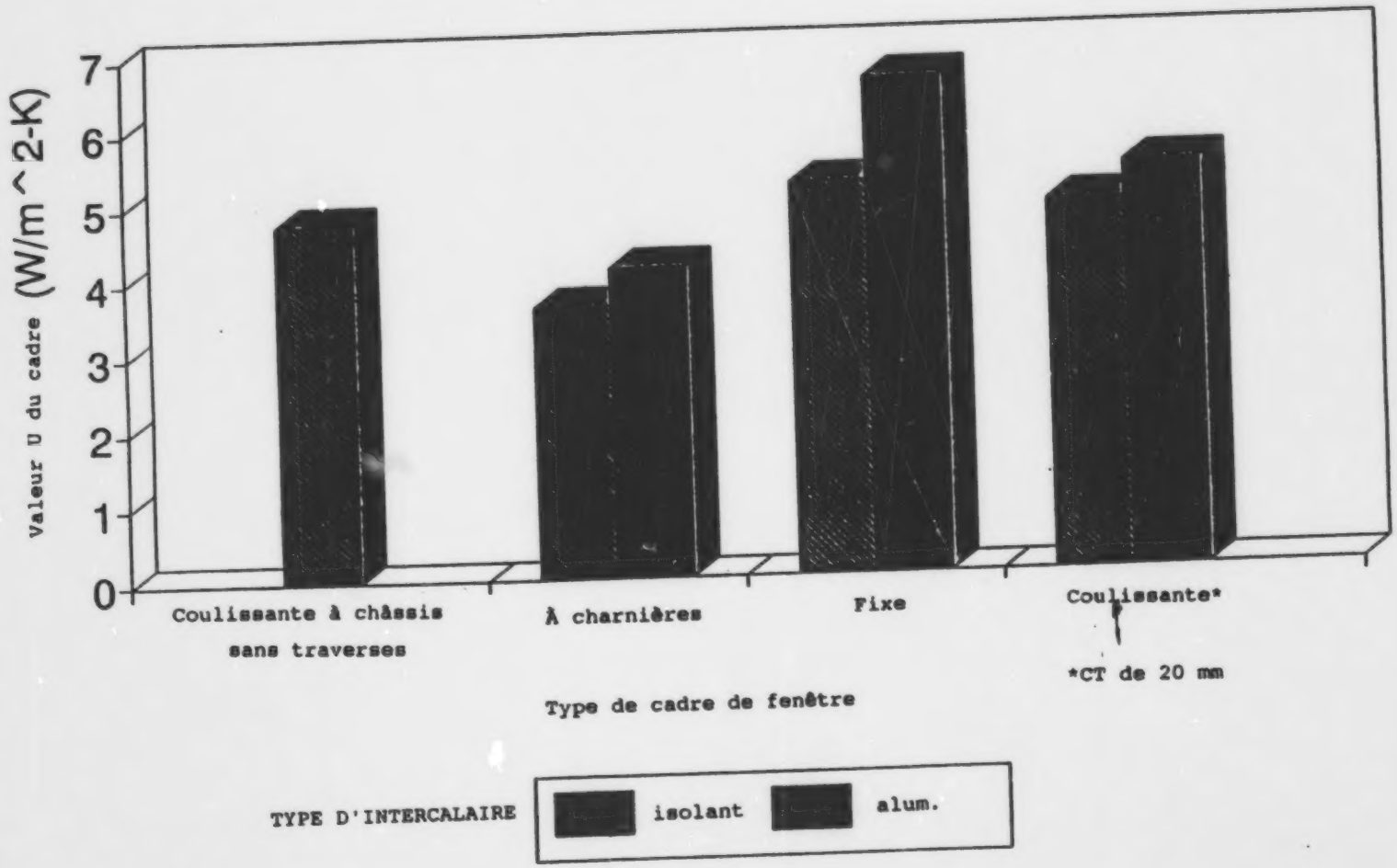
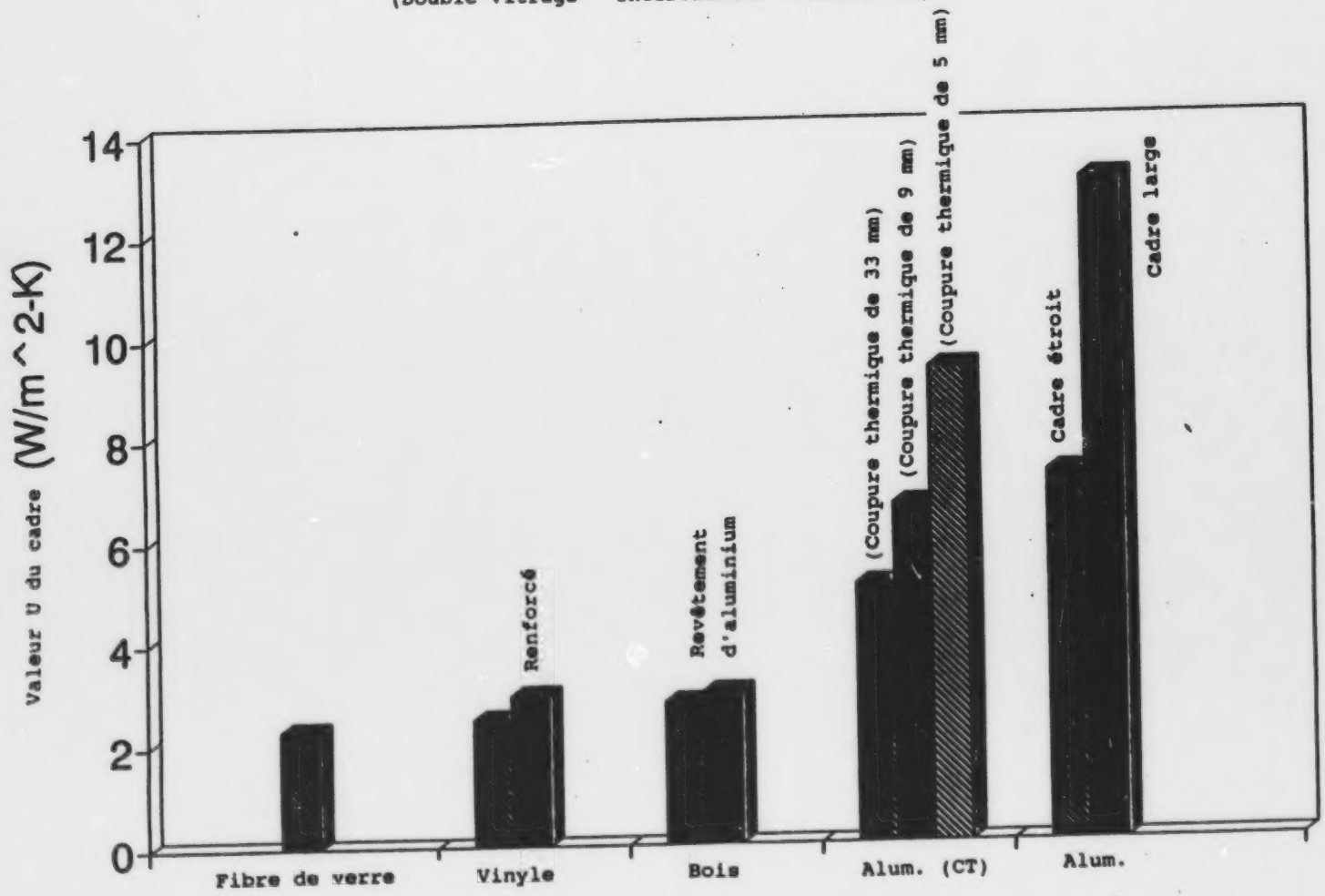


Figure 11 Cadres de fenêtre fixe
(Double vitrage - Intercalaire d'aluminium)



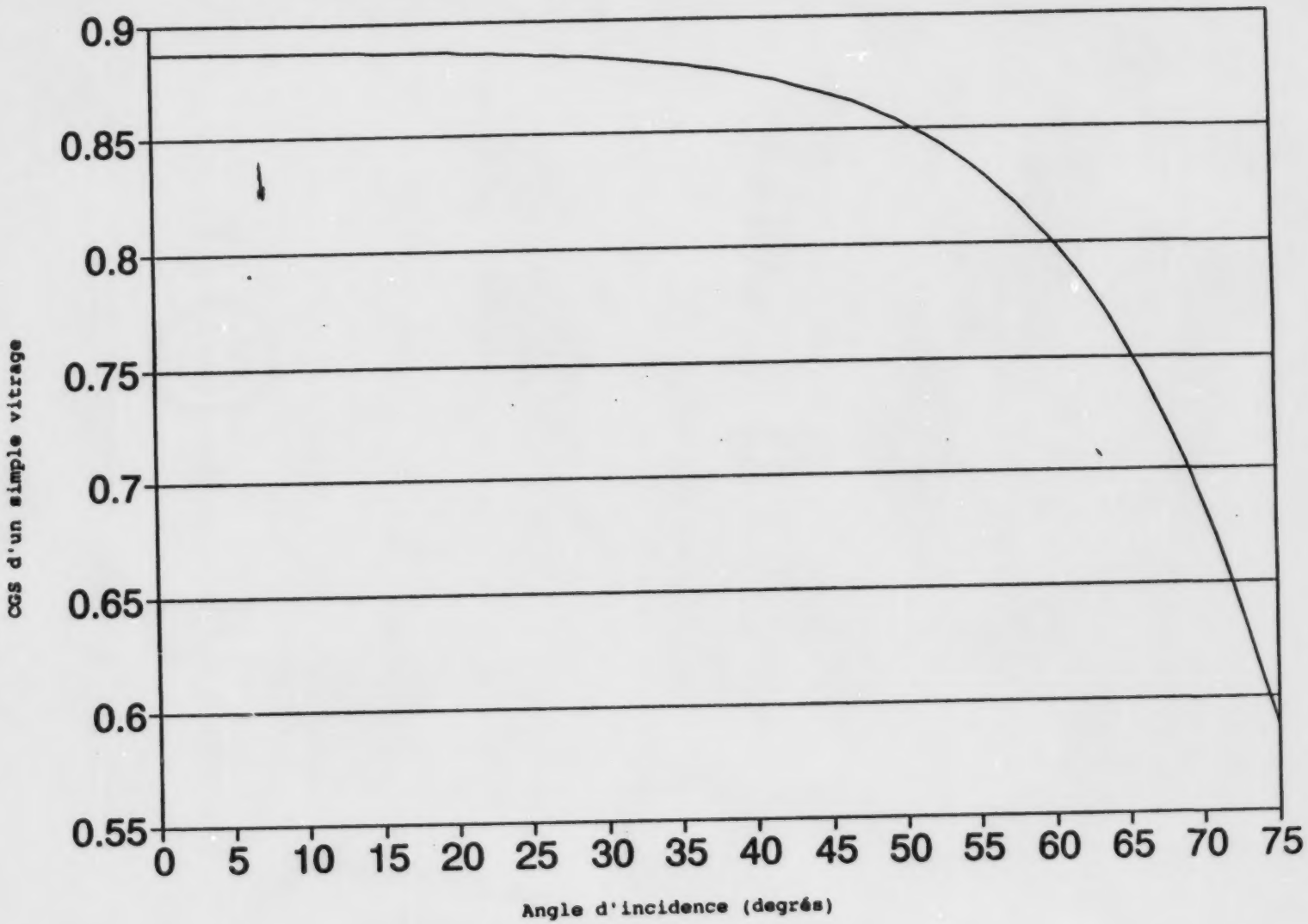
4. DÉTERMINATION DU CGS GLOBAL DES FENÊTRES

4.1 Méthodologie

Le coefficient de gain solaire (CGS) est la fraction du rayonnement solaire incident sur une fenêtre qui parvient à l'intérieur du bâtiment, y compris le rayonnement qui est absorbé par les vitrages et se transmet par conduction ou par réflexion à l'intérieur du bâtiment. Certaines sources préfèrent utiliser le "coefficient d'ombrage" qui est le CGS de la fenêtre divisé par le CGS d'une fenêtre de référence à simple vitrage. Le CGS est une caractéristique de chaque type de vitrage et varie légèrement avec l'angle d'incidence. La méthode conventionnelle pour déterminer le CGS global d'une fenêtre consiste à présumer que le CGS du cadre est nul et que celui de la bordure du vitrage est identique à celui du centre du vitrage. Le CGS du centre du vitrage d'une fenêtre est généralement mesuré dans une seule condition atmosphérique et on présume qu'il demeure constant tout au long de la période de chauffage. Cette méthode soulève trois questions importantes : de quelle façon le CGS est-il affecté par les variations de température extérieure, par le coefficient d'échange superficiel extérieur et par l'intensité de rayonnement incident? comment le CGS varie-t-il selon l'angle d'incidence entre le faisceau de rayonnement et la perpendiculaire du vitrage? et comment les pertes de chaleur par le cadre et par la bordure affectent-elles le CGS d'une fenêtre (bref, le cadre a-t-il un CGS important)?

La présente section porte sur l'utilisation des logiciels VISION et FRAME pour répondre à ces questions. Le logiciel VISION calcule rapidement et précisément le coefficient d'ombrage pour la portion centrale du vitrage d'une fenêtre. Le CGS peut ensuite être calculé en multipliant le coefficient d'ombrage par le CGS de la fenêtre de référence à simple vitrage. La figure 12 illustre la dépendance angulaire du CGS de la fenêtre de référence à simple vitrage basée sur les données fournies par le 1989 ASHRAE Handbook of Fundamentals. Le logiciel VISION a été utilisé pour analyser l'effet de la température extérieure, de l'intensité du rayonnement solaire et du coefficient d'échange superficiel extérieur sur le CGS d'une fenêtre. Le logiciel FRAME a servi à analyser l'effet des pertes de chaleur par la cadre et par la bordure du vitrage sur le CGS et à déterminer si les cadres de fenêtre ont un CGS important.

FIGURE 12 CGS d'un simple vitrage en fonction de l'angle d'incidence



Bien qu'il soit reconnu que le CGS est fonction de nombreux paramètres, le présent rapport cherche à déterminer si les variations de ces paramètres sont suffisamment importantes pour qu'on s'y attarde ou si l'exclusion de leurs effets donne à un certain type de fenêtre un avantage indu dans la comparaison du rendement énergétique.

4.2 CGS du centre du vitrage

4.2.1 Effets des conditions climatiques

La variation du CGS du centre du vitrage en fonction de la température extérieure, de l'intensité du rayonnement solaire et du coefficient d'échange superficiel extérieur a été analysée à l'aide du logiciel VISION. Un double vitrage avec un seul enduit faible émissivité (e = 0.09) a été simulé, et on a fait varier chacun des trois paramètres indépendamment. La température intérieure et l'angle d'incidence ont été maintenus constants respectivement à 21 °C et à zéro degré pour toutes les simulations. Le logiciel VISION calcule le coefficient d'échange superficiel extérieur à partir de la vitesse de vent, on a donc fait varier cette vitesse de manière à obtenir la plage désirée de conditions.

On a d'abord fait varier la température extérieure pendant que la vitesse du vent était réglée à 6.7 m/s (condition hivernale de l'ASHRAE) et le rayonnement solaire était maintenu constant à 783 W/m^2 (condition estivale de l'ASHRAE : la condition hivernale de 0 W/m^2 était inappropriée). La température extérieure à été réglée aux valeurs suivantes : -18 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C et 20 °C. Le tableau 12 indique le CGS pour chaque température : la variation du CGS était inférieure à 0.7 % d'une extrémité à l'autre de la plage de températures.

On a ensuite fait varier l'intensité du rayonnement solaire pendant que la température extérieure était maintenue constante à -18 °C et que la vitesse du vent était réglée à 6.7 m/s (conditions hivernales de l'ASHRAE). L'intensité de rayonnement solaire a été réglée à 783 W/m^2, à 600 W/m^2, à 400 W/m^2 et à 200 W/m^2. La variation du CGS était inférieure à 0.2 % entre 783 W/m^2 et 200 W/m^2 (voir tableau 12).

Tableau 12 : Variation du CGS en fonction des conditions climatiques

Temp. ext. (°C)	CGS
-18	0.652
-10	0.652
0	0.653
10	0.654
20	0.656

Temp. int. = 21 °C
Ray. sol. = 783 W/m^2
Vent = 6.7 m/s

Ray. (W/m^2)	CGS
783	0.652
600	0.652
400	0.653
200	0.653

Temp. int. = 21 °C
Temp. ext. = -18 °C
Vent = 6.7 m/s

Vent (m/s)	CGS
6.7	0.652
3.4	0.650
2.2	0.649
1.0	0.648

Temp. int. = 21 °C
Temp. ext. = -18 °C
Ray. sol. = 783 W/m^2

Enfin, on a fait varier la vitesse du vent pendant que la température extérieure était maintenue constante à -18 °C et que l'intensité de rayonnement solaire était réglée à 783 W/m^2. La vitesse de vent a été réglée à 6.7 m/s, à 3.35 m/s, à 2.2 m/s et à 1.0 m/s. Comme l'indique le tableau 12, le CGS a varié de moins de 0.5 % entre 6.7 m/s et 1.0 m/s.

Ces résultats indiquent que la température extérieure, l'intensité du rayonnement solaire et le coefficient d'échange superficiel extérieur ont très peu d'effet sur le CGS d'une fenêtre non teintée : dans tous les cas, l'effet était inférieur à 0.7 %, quel que soit le paramètre qu'on a fait varier. (Des effets supérieures seraient probablement enregistrés dans le cas des fenêtres fortement teintées qu'on retrouve couramment dans les immeubles commerciaux.)

4.2.2 Effet d'une incidence non perpendiculaire

La variation du CGS à des angles d'incidence différents de la perpendiculaire peut facilement être déterminée à l'aide du logiciel VISION. Ce logiciel modélise un transfert thermique unidimensionel à travers la partie centrale du vitrage. Huit configurations de vitrage ont été modélisées avec VISION pour étudier l'effet de l'angle d'incidence du faisceau de rayonnement solaire sur le CGS. Les huit systèmes de vitrage incluaient : un double vitrage (DV), un double vitrage avec un enduit faible émissivité (DVFE), un double vitrage avec deux enduits faible émissivité (DVDFE), un triple vitrage (TV), un triple vitrage avec un enduit faible émissivité (TVFE), un triple vitrage avec deux enduits faible émissivité (TVDFE) et un double vitrage avec deux pellicules Heat Mirror (DVHM). Tous les enduits faible émissivité utilisés avaient une émissivité de 0.09.

Les CGS pour les huit configurations de vitrage ont été calculés en fonction de l'angle d'incidence du faisceau de rayonnement. L'angle d'incidence a été augmenté par paliers de 15 degrés de 0 à 90 degrés. Le tableau 13 fournit les résultats pour les huit systèmes de vitrage. Un coefficient d'angle d'incidence non perpendiculaire (F_i) a été calculé en divisant chaque CGS par la valeur du rayonnement perpendiculaire. Le coefficient d'angle d'incidence non perpendiculaire peut servir à modifier l'équation de gain solaire comme suit :

$Q_{sol} = CGS_n * F_i * I_t$

où CGS_n est le coefficient de gain solaire de la fenêtre à un angle d'incidence perpendiculaire.

Le tableau 13 indique également le F_i pour les huit systèmes de vitrage.

Le coefficient d'angle d'incidence non perpendiculaire a été caractérisé par la relation suivante [Duffie et Beckman, 1980] :

$$F_i = 1 - A * [(1/\cos(B)) - 1] \qquad (4)$$

où A est une constante
B est l'angle d'incidence

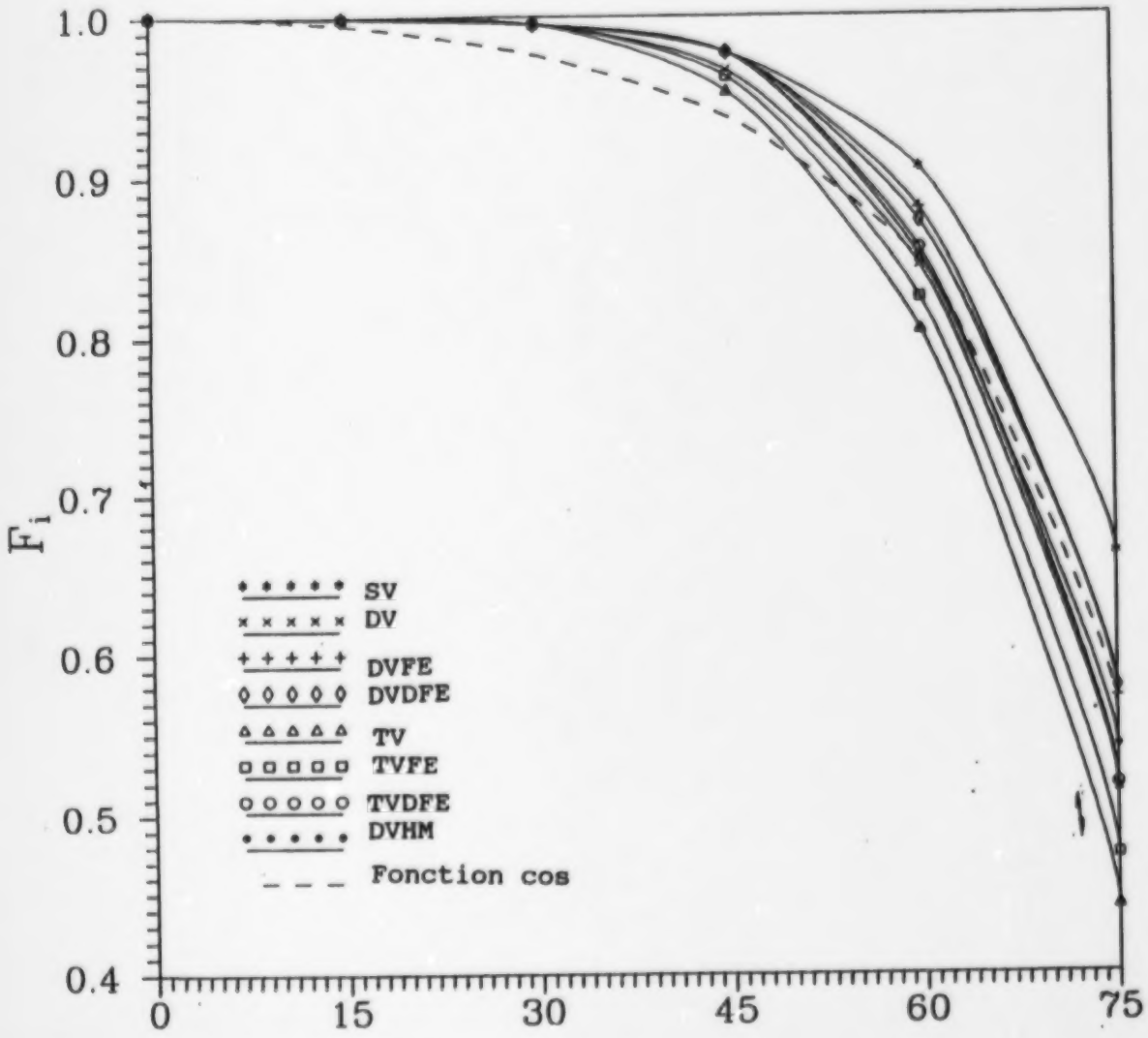
La valeur de la constante A a été déterminée pour chaque angle d'incidence des sept systèmes de vitrage. Une valeur de A de 0.153 produit la plus faible erreur par rapport aux valeurs moyennes de F_i. Les coefficients d'angle d'incidence non perpendiculaire pour les huit vitrages, calculés à l'aide de l'équation 4, sont indiqués à la figure 13. Cette figure indique qu'à des angles d'incidence d'au plus 30° par rapport à la perpendiculaire, tous les vitrages ont une valeur de F_i également à 1.0. Par contre, à un angle d'incidence de 60°, il y a un écart de 15 % entre les valeurs supérieure et inférieure.

Duffie et Beckman [1980] ont produit des graphiques d'angles d'incidence mensuels moyens pour un éventail d'orientations et de latitudes. Pendant la saison de chauffage, à des latitudes comprises entre 40 et 50 degrés, l'angle d'incidence moyen pour le faisceau de rayonnement solaire sur une surface verticale orientée au sud est d'environ 45 degrés. L'angle d'incidence moyen pour le rayonnement diffus et réfléchi est également proche de 45 degrés. Par conséquent, un angle d'incidence moyen de 45 degrés est typique pour la plupart des localités au Canada. À cet angle, il n'y a pas d'écart important dans la correction de l'angle d'incidence entre les différents vitrages. Par conséquent, il est recommandé que l'équation 4 soit utilisée pour corriger l'incidence non perpendiculaire, quel que soit le type de vitrage.

Tableau 13 : Variation du CGS en fonction de l'angle d'incidence

TYPE DE VITRAGE	COEFFICIENT DE GAIN SOLAIRE (CGS) ANGLE ENTRE LA PERPENDICULAIRE DU VITRAGE ET LE FAISCEAU DE RAYONNEMENT						
	0	15	30	45	60	75	90
SV	0.887	0.887	0.883	0.867	0.803	0.588	
DV	0.799	0.798	0.795	0.771	0.674	0.411	0.000
DVFE	0.648	0.647	0.645	0.633	0.570	0.370	0.000
DVDFE	0.488	0.488	0.486	0.477	0.425	0.282	0.000
TV	0.719	0.718	0.716	0.686	0.578	0.317	0.000
TVFE	0.595	0.594	0.592	0.572	0.490	0.282	0.000
TVDFE	0.488	0.488	0.486	0.477	0.417	0.253	0.000
DVHM	0.293	0.293	0.292	0.286	0.249	0.159	0.000
	COEFFICIENT D'ANGLE D'INCIDENCE NON PERPENDICULAIRE (F_i)						
SV	1.000	0.999	0.995	0.977	0.905	0.662	
DV	1.000	0.999	0.995	0.966	0.844	0.515	0.000
DVFE	1.000	0.999	0.995	0.977	0.880	0.572	0.000
DVDFE	1.000	0.999	0.995	0.977	0.872	0.578	0.000
TV	1.000	0.999	0.995	0.953	0.804	0.442	0.000
TVFE	1.000	0.999	0.995	0.962	0.824	0.474	0.000
TVDFE	1.000	0.999	0.995	0.977	0.855	0.518	0.000
DVHM	1.000	0.999	0.995	0.977	0.850	0.542	0.000

FIGURE 13 : Correction du CGS pour une incidence non perpendiculaire



4.2.3 Tableau des CGS du centre du vitrage

Le CGS du centre du vitrage de chacun des systèmes de vitrage énumérés au tableau 5 a été calculé à l'aide du logiciel VISION. Les CGS ont été calculés avec un rayonnement incident perpendiculaire à la fenêtre, à une température extérieure de -18 °C et avec un coefficient d'échange superficiel extérieur correspondant à un vent de 6.7 m/s. Les valeurs calculées des CGS au centre du vitrage sont listées au tableau 14. (Remarque : le remplissage à l'argon et l'espacement entre les vitrages avaient un effet négligeable sur le CGS.)

4.3 CGS du cadre et de la bordure du vitrage

La méthode conventionnelle pour déterminer le CGS global d'une fenêtre consiste à présumer que le CGS du cadre et nul et que celui de la bordure du vitrage est identique à celui du centre du vitrage. La présente partie du rapport analyse l'effet des pertes de chaleur par le cadre et par la bordure du vitrage sur le CGS global de la fenêtre.

Un double vitrage a été modélisé dans trois types de cadre, avec et sans rayonnement solaire, afin d'étudier l'effet du transfert thermique par le cadre et par la bordure du vitrage sur le CGS de la fenêtre. Le rayonnement a d'abord été modélisé perpendiculairement à la fenêtre. Les trois types de cadre modélisés étaient en aluminium, en aluminium avec coupure thermique et en bois. L'annexe B fournit les vues en coupe de ces cadres (P2, P3 et P12 respectivement). Les cadres ont été simulés à l'aide du logiciel FRAME afin de modéliser le transfert thermique bidimensionnel à travers le cadre et la bordure du vitrage de la fenêtre.

Le gain solaire par le cadre a été déterminé à partir de la réduction des pertes de chaleur par le cadre en raison du rayonnement solaire incident sur ce dernier. Le CGS du cadre a été défini comme le gain solaire par le cadre divisé par le rayonnement solaire incident sur la surface projetée du cadre. Le gain solaire à travers la bordure du vitrage incluait le rayonnement solaire transmis à travers le vitrage et absorbé dans la pièce en plus de la réduction de pertes de chaleur par la bordure du vitrage en

Tableau 14 : CGS au centre du vitrage calculés par VISION

SYSTÈME DE VITRAGE		CGS
Single		
Clear Glass		0.87
Tinted Glass		0.74
Double Glass		
Clear		0.78
e = 0.09	on one surface	0.64
e = 0.20	on one surface	0.75
e = 0.35	on one surface	0.72
Tinted*		0.64
e = 0.09	on one surface	0.51
e = 0.20	on one surface	0.60
e = 0.35	on one surface	0.58
Triple Glass		
Clear		0.70
e = 0.09	on one surface	0.57
e = 0.20	on one surface	0.67
e = 0.35	on one surface	0.65
Tinted*		0.57
e = 0.09	on one surface	0.46
e = 0.20	on one surface	0.54
e = 0.35	on one surface	0.52
Clear		
e = 0.09	on two surfaces	0.44
e = 0.20	on two surfaces	0.66
e = 0.35	on two surfaces	0.57
Tinted*		
e = 0.09	on two surfaces	0.39
e = 0.20	on two surfaces	0.51
e = 0.35	on two surfaces	0.48
Double Glass plus		
One Heat Mirror™ 66		0.40
One Heat Mirror™ 88		0.69
Two Heat Mirror™ 66		0.27
Two Heat Mirror™ 88		0.50

* s'applique à un carreau extérieur de verre gris ou vert de 3 mm et à un carreau intérieur clair

raison du rayonnement solaire incident. Le CGS de la bordure du vitrage a été calculé en divisant le gain solaire par la bordure du vitrage par le rayonnement solaire incident. Le tableau 15 permet de comparer le CGS pour la méthode de calcul conventionnelle avec les résultats pour les trois cadres modélisés au cours de notre étude.

Le tableau 15 indique également l'écart entre le CGS obtenu par la méthode de calcul conventionnelle et celui déterminé par la modélisation des cadres de la présente étude. Le CGS pour la fenêtre à cadre de bois n'a pas varié par rapport à la méthode de calcul conventionnelle (la diminution du CGS pour la bordure du vitrage est compensée par l'augmentation de la valeur du cadre) et on pourrait s'attendre à des résultats similaires pour les cadres de valeur U voisine (vinyle, fibre de verre, etc.). Les CGS pour les fenêtres à cadre d'aluminium avec et sans coupure thermique ont subi une augmentation de 1.6 % et 2.4 % respectivement par rapport à la méthode de calcul conventionnelle. Les CGS des cadres d'aluminium avec et sans coupure thermique ont été de 0.10 et 0.14 respectivement.

La phase suivante de l'étude consistait à modéliser les cadres avec une rayonnement solaire à un angle d'incidence de 45 degrés. Le cadre de bois a été éliminé de la suite des opérations parce que son CGS n'a pas subi de variation par rapport à sa valeur calculée par la méthode de calcul traditionnelle lorsqu'il était exposé à un rayonnement solaire perpendiculaire au vitrage. Les cadres d'aluminium avec et sans coupure thermique ont été modélisés avec le rayonnement à un angle de 45 degrés et les résultats obtenus ont été comparés à ceux sans rayonnement incident. Le gain solaire du cadre a été calculé de la même façon qu'avec le rayonnement perpendiculaire. Le gain solaire à travers la bordure du vitrage incluait le rayonnement solaire transmis à travers le vitrage et absorbé dans la pièce, plus la réduction de pertes de chaleur par la bordure du vitrage, moins le rayonnement incident transmis sur la partie intérieure du cadre (qui était incluse dans le modèle de cadre). Les CGS des deux types de cadres avec un rayonnement incident à 45 degrés sont comparés à ceux obtenus par la méthode conventionnelle de calcul au tableau 16. Les CGS des deux cadres ont augmenté de 4.4 % par rapport à leur valeur calculée selon la méthode conventionnelle. Toutefois, cette augmentation peut être un peu surévaluée puisque le cadre peut ombrager une partie du verre, réduisant ainsi le gain solaire à l'intérieur de la pièce.

Tableau 15 : CGS du cadre et de la bordure du vitrage pour un rayonnement solaire perpendiculaire à la fenêtre

TYPE DE CADRE	ALUMINIUM		ALUMINIUM AVEC COUPURE THERMIQUE		BOIS	
MÉTHODE DE CALCUL	CONV.*	MOD.**	CONV.	MOD.	CONV.	MOD.
CGS						
Centre du vitrage	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783	0.783
Bordure du vitrage	0.783	0.777	0.783	0.775	0.783	0.765
Cadre	0.000	0.138	0.000	0.100	0.000	0.021
Fenêtre	0.681	0.698	0.681	0.683	0.635	0.635
% d'augmentation		2.4		1.6		0.0

* Calcul conventionnel

** Calcul modifié

Conditions : $h_i = 7.5$ et $h_o = 34.4$ W/(m^2*C)

Tableau 16 : CGS du cadre et de la bordure du vitrage pour un rayonnement solaire à 45 degrés par rapport au vitrage

	MÉTHODE DE CALCUL			
	CONVENTIONNELLE	MODIFIÉE	CONVENTIONNELLE	MODIFIÉE
CGS	CADRE D'ALUMINIUM	CADRE D'ALUMINIUM	CADRE D'ALUMINIUM	CADRE D'ALUMINIUM AVEC COUPURE THERMIQUE
Centre du vitrage	0.783	0.783	0.783	0.783
Bordure du vitrage	0.783	0.791	0.783	0.791
Cadre	0.000	0.226	0.000	0.228
Fenêtre	0.681	0.712	0.681	0.713
% d'augmentation		4.4		4.4

Conditions : $h_i = 7.5$ et $h_o = 34.4$ W/(m^2*C)

Tableau 17 : Variation des CGS du cadre et de la bordure du vitrage avec un coefficient d'échange superficiel extérieur pour une fenêtre à cadre d'aluminium

	MÉTHODE DE CALCUL			
	CONVENTIONNELLE	MODIFIÉE	MODIFIÉE	MODIFIÉE
CGS		(h_o = 34.0)	(h_o = 20.0)	(h_o = 16.0)
Centre du vitrage	0.783	0.783	0.783	0.783
Bordure du vitrage	0.783	0.777	0.789	0.795
Cadre	0.000	0.138	0.203	0.232
Fenêtre	0.681	0.698	0.709	0.714
% d'augmentation		2.4	3.9	4.6

Conditions : $h_i = 7.5$ W/(m^2*C), rayonnement perpendiculaire

Pour l'analyse qui précède, nous avons utilisé un coefficient d'échange superficiel extérieur de 34.0 W/(m^2*C) (correspondant à un vent de 6.7 m/s) dans les deux cas. Cette partie de l'étude portait sur l'effet du coefficient d'échange superficiel extérieur sur le transfert thermique par le cadre et par la bordure du vitrage et ses répercussions sur le CGS de la fenêtre. Le cadre d'aluminium a été modélisé avec des coefficients d'échange superficiel extérieur de 20 et 16 W/(m^2*C) afin de représenter des conditions de vent plus réalistes (4.5 et 3.3 m/s respectivement). Dans chaque cas, le cadre a été modélisé une fois avec le rayonnement solaire perpendiculaire à la fenêtre et une fois sans rayonnement.

Les CGS pour les trois coefficients d'échange superficiel extérieur ont été comparés à ceux calculés selon la méthode conventionnelle et sont incorporés au tableau 17. L'augmentation des CGS par rapport aux valeurs obtenues par la méthode conventionnelle varie entre 2.6 et 4.6 %.

Ces résultats indiquent que le transfert thermique par la bordure du vitrage a très peu d'effet sur le CGS du centre du vitrage et est négligeable. Le CGS du cadre est négligeable dans le cas des cadres en bois et produit un effet de moins de 5 % sur les fenêtres dont le cadre est en aluminium avec ou sans coupure thermique. L'analyse des simulations a révélé que le CGS du cadre est bien caractérisé comme une fonction linéaire de la valeur U du cadre. Les équations suivantes sont recommandées :

$$CGS_{fr} = 0.015 * a_{fr} * U_{fr} \quad \text{pour un vent de 6.7 m/s} \qquad (5)$$

$$= 0.025 * a_{fr} * U_{fr} \quad \text{pour un vent de 3.3 m/s}$$

où a_{fr} est l'absorptivité du cadre (0.9 pour les cadres sombres, 0.22 pour les cadres blancs)

U_{fr} est le coefficient de perte de chaleur du cadre en W/(m^2*C)

5. MÉTHODE MANUELLE DE CALCUL DE LA VALEUR U ET DU CGS GLOBAUX DES FENÊTRES

5.1 Méthode

La présente section décrit la méthode de calcul de la valeur U et du CGS globaux des fenêtres pour un rayonnement perpendiculaire et donne deux exemples de calculs. L'annexe C contient une feuille de calcul de la valeur U et du CGS globaux des fenêtres.

5.1.1 Valeur U globale de la fenêtre

La valeur U globale de la fenêtre se calcule comme suit :

$$U_{total} = U_{cg} * F_{cg} + U_{eg} * F_{eg} + U_{fr} * F_{fr} \qquad (6)$$

où U_{total} = valeur U globale de la fenêtre
U_{cg} = valeur U du centre du vitrage
U_{eg} = valeur U de la bordure du vitrage
U_{fr} = valeur U du cadre
F_{cg} = fraction centre du vitrage (d'après sa surface projetée)
F_{eg} = fraction bordure du vitrage (d'après sa surface projetée)
F_{fr} = fraction cadre (d'après sa surface projetée)

La valeur U du centre du vitrage est tirée du tableau 5 pour la configuration de vitrage appropriée (c.-à-d. le nombre de vitrages, l'espacement entre carreaux, les enduits et le gaz de remplissage).

La valeur U de la bordure du vitrage a été calculée à l'aide de la corrélation décrite à la section 3.3. La valeur U de la bordure du vitrage est fonction de la valeur U du centre du vitrage et du type d'intercalaire. La corrélation indiquée à la section 3.3. est la suivante :

$$U_{eg} = A + B * U_{cg} + C * U_{cg}^2 \qquad (3)$$

ou A, B et C sont les constantes fournies au tableau 6.

Le tableau 6 inclut des constantes pour des intercalaires métalliques, isolants et de verre fondu. Ce tableau fournit également des constantes pour la combinaison d'un intercalaire métallique et d'un intercalaire isolant à l'intérieur du même vitrage.

Les valeurs U des différents types de cadres sont tirées des tableaux 8 à 11. Les valeurs U de ces tableaux s'appliquent aux cadres avec des intercalaires métalliques et isolants seulement. Lorsqu'un intercalaire de verre fondu est utilisé, la valeur U du cadre est la somme de la moitié de la valeur U avec un intercalaire métallique et de la moitié de la valeur U avec un intercalaire isolant. Lorsqu'un vitrage contient à la fois un intercalaire métallique et un intercalaire isolant, la valeur U du cadre est la somme de 15 % de la valeur U avec deux intercalaires métalliques et de 85 % de la valeur U avec deux intercalaires isolants.

La fraction cadre est calculée comme suit :

Fenêtres fixes et à charnières

$$F_f = [(H * W) - (H - 2 * H_{fr}) (W - 2 * H_{fr})] / (H * W) \quad (7)$$

Fenêtres coulissant verticalement

$$F_f = [((H/2) * W) - ((H/2) - 2 * H_{fr}) * (W - 2 * H_{fr})] / ((H/2) * W) \quad (8)$$

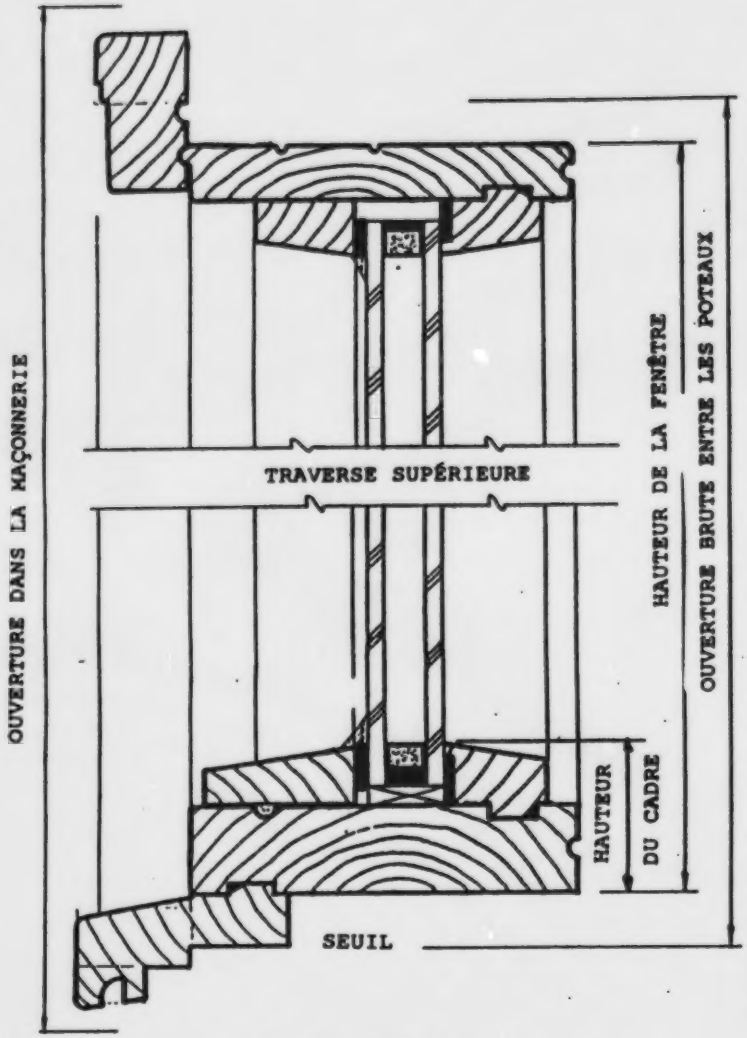
Fenêtres coulissant horizontalement

$$F_f = [(H * (W/2)) - (H - 2 * H_{fr}) * ((W/2) - 2 * H_{fr})] / (H * (W/2)) \quad (9)$$

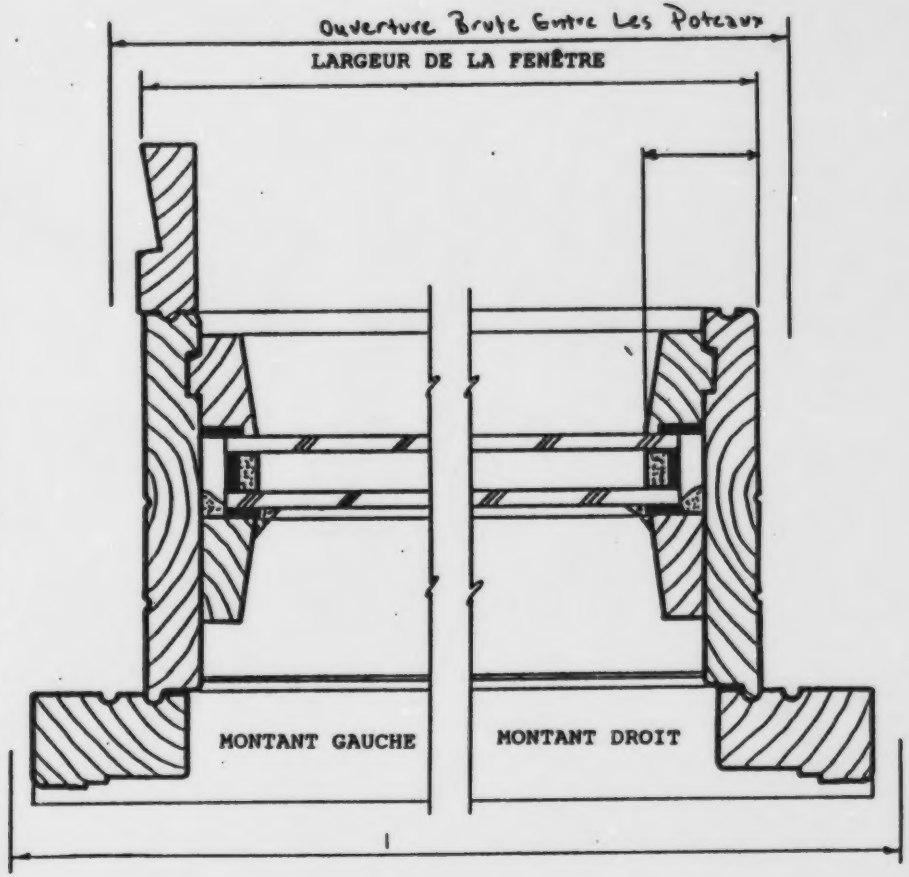
où H est la hauteur de la fenêtre (mm) (voir la figure 14)
W est la largeur de la fenêtre (mm) (voir la figure 14)
H_{fr} est la hauteur moyenne du cadre (mm) (voir la figure 14)

Cette hauteur de cadre est tirée des tableaux 8 à 11.

FIGURE 14 : DIMENSIONS DES FENÊTRES



COUPE VERTICALE



COUPE HORIZONTALE

La fraction du centre du vitrage est calculée comme suit :

Fenêtres fixes et à charnières

$$F_{cg} = [(H * W) - (H - 127 - 2 * H_b) * (W - 127 - 2 * W_b)] / (H * W) \quad (10)$$

Fenêtres coulissant verticalement

$$F_{cg} = [(H/2 * W) - (H/2 - 127 - 2 * H_b) * (W - 127 - 2 * W_b)] / (H/2 * W) \quad (11)$$

Fenêtres coulissant horizontalement

$$F_{cg} = [(H * W/2) - (H - 127 - 2 * H_b) * (W/2 - 127 - 2 * W_b)] / (H * W/2) \quad (12)$$

où 127 mm est le double de la hauteur de la bordure de vitrage couramment acceptée [ASHRAE, 1989].

La fraction bordure du vitrage est calculée comme suit :

$$F_{eg} = 1 - F_{cg} - F_{fr} \quad (13)$$

5.1.2 CGS global de la fenêtre

Le CGS global de la fenêtre pour un rayonnement perpendiculaire se calcule comme suit :

$$CGS_{total} = CGS_{cg} * F_{cg} + CGS_{eg} * F_{eg} + CGS_{fr} * F_{fr}$$

où CGS_{total} = coefficient de gain solaire global de la fenêtre
CGS_{cg} = coefficient de gain solaire du centre du vitrage
CGS_{eg} = coefficient de gain solaire de la bordure du vitrage
CGS_{fr} = coefficient de gain solaire du cadre

Le CGS du centre du vitrage est tiré du tableau 14 pour la configuration de vitrage appropriée (c.-à-d. le nombre de vitrages, l'espacement entre carreaux, les enduits et le gaz de remplissage).

Le CGS de la bordure du vitrage est égal à celui du centre du vitrage.

Le CGS du cadre est calculé à l'aide de l'équation 5.

$$CGS_{fr} = 0.015 * a_{fr} * U_{fr} \qquad (5)$$

où a_{fr} est l'absorptivité du cadre (0.9 pour les cadres sombres, 0.22 pour les cadres blancs)

U_{fr} est le coefficient de perte de chaleur du cadre en $W/(m^2*C)$

5.2 Exemples de calculs

5.2.1 Exemple 1

Voici un exemple de calcul de la valeur U et du CGS d'un double vitrage avec un enduit faible émissivité (e = 0.09), une cavité emplie d'argon, un intercalaire isolant et un espacement entre carreaux de 13 mm dans un cadre de fenêtre à battants en bois. La fenêtre a 600 mm de largeur et 1200 mm de hauteur.

- Valeur U du centre du vitrage

Système de vitrage - Double vitrage
- un enduit faible-e (e = 0.09)
- espacement de 13 mm entre les carreaux
- cavité emplie d'argon

Selon le tableau 5 $U_{cg} = 1.56\ W/(m^2*C)$

Valeur U de la bordure du vitrage

Type d'intercalaire - Un intercalaire isolant

Selon le tableau 6 A = 0.681
B = 0.682
C = 0.043
U_{eg} = 1.85 W/(m^2*C)

Valeur U du cadre

Cadre - À battants, en bois
- Intercalaire isolant

Selon le tableau 9 U_{fr} = 2.09 W/(m^2*C) et H_{fr} = 78.1 mm

CGS du centre du vitrage

Selon le tableau 14 CGS_{cg} = 0.64

Le reste des calculs est fourni à la figure 15. La valeur U globale de cette fenêtre est de 1.82 W/(m^2*C) et son CGS, de 0.42.

5.2.2 Exemple 2

Voici un exemple de calcul de la valeur U et du CGS d'un triple vitrage avec deux enduits faible émissivité (e = 0.20), cavités emplies d'argon, un intercalaire isolant et un intercalaire métallique, un espacement entre carreaux de 13 mm dans un cadre de fenêtre à guillotine (coulissant verticalement) en bois revêtu d'aluminium. La fenêtre a 900 mm de largeur et 1500 mm de hauteur.

Valeur U du centre du vitrage

Système de vitrage - Triple vitrage
- Deux enduits faible-e (e = 0.20)
- espacement de 13 mm entre les carreaux
- cavités emplies d'argon

Selon le tableau 5 U_{cg} = 0.96 W/(m^2*C)

Figure 15 Exemple de calcul 1
FEUILLE DE CALCUL DE LA VALEUR U ET DU CGS GLOBAUX DES FENÊTRES

ÉTAPE 1 VALEUR U DE LA FENÊTRE

I Valeur U du centre du vitrage selon le tableau 5
Valeur U du centre du vitrage — 1.56

II Constantes de valeur de la bordure du vitrage selon le tableau 6
A = 0.681, B = 0.683, C = 0.043
$U_{eg} = A + B * U_{cg} + C * U_{cg}^2$ = — 1.85

III Valeur U du cadre selon les tableaux 8 à 11
Intercalaire métallique
Intercalaire isolant
Intercalaire de verre 0.50 * $U_{métal}$ + 0.50 * U_{isol} = — 2.09
Interc. métal. + isol. 0.15 * $U_{métal}$ + 0.85 * U_{isol} =

IV Fractions éléments
Hauteur du cadre et largeur et hauteur de la fenêtre [mm]
Largeur de la fenêtre, W = 600, Hauteur, H = 1200
Hauteur du cadre = 78.1, selon les tableaux 8 à 11
Fraction cadre
Fenêtres fixes et à charnières
$F_{fr} = [(W * H) - (W - 2 * H_{fr}) * (H - 2 * H_{fr})] / (W * H)$ — 0.36
Fenêtres coulissant verticalement
$F_{fr} = [(W * (H/2)) - (W - 2 * H_{fr}) * ((H/2) - 2 * H_{fr})] / (W * (H/2))$
Fenêtres coulissant horizontalement
$F_{fr} = [((W/2) * H) - ((W/2) - 2 * H_{fr}) * (H - 2 * H_{fr})] / ((W/2) * H)$
Fraction centre du vitrage
Fenêtres fixes et à charnières
$F_{cg} = [(W - 2 * H_{fr} - 127) * (H - 2 * H_{fr} - 127)] / (W * H)$ — 0.40
Fenêtres coulissant verticalement
$F_{cg} = [(W - 2 * H_{fr} - 127) * ((H/2) - 2 * H_{fr} - 127)] / (W * (H/2))$
Fenêtres coulissant horizontalement
$F_{cg} = [((W/2) - 2 * H_{fr} - 127) * (H - 2 * H_{fr} - 127)] / ((W/2) * H)$
Fraction bordure du vitrage
$F_{eg} = 1 - F_{cg} - F_{fr}$ — 0.24

V Valeur U de la fenêtre
$U_{total} = U_{cg} * F_{cg} + U_{eg} * F_{eg} + U_{fr} * F_{fr}$ — 1.82

ÉTAPE 2 CALCUL DU CGS

I CGS du centre du vitrage selon le tableau 14
CGS_{cg} — 0.64

II CGS du cadre
$CGS_{fr} = 0.015 * 0.9 * U_{fr}$ = — 0.03

III CGS de la fenêtre
$CGS_{total} = CGS_{cg} * (F_{cg} + F_{eg}) + CGS_{fr} * F_{fr}$ = — 0.42

Valeur U de la bordure du vitrage

Type d'intercalaire - un intercalaire isolant, un intercalaire métallique

Selon le tableau 6

A = 0.769

B = 0.706

C = 0.033

U_{cg} = 1.48

Valeur U du cadre

Cadre - bois revêtu d'aluminium, coulissant verticalement

- un intercalaire isolant, un intercalaire métallique

Selon le tableau 9

U_{fr}(métallique) = 3.25 W/(m^2*C)

U_{fr}(isolant) = 2.65 W/(m^2*C)

U_{fr} = 0.15 * (3.25) + 0.85 * (2.65) = 2.74 W/(m^2*C)

H_{fr} = 58.4 mm

CGS du centre du vitrage

Selon le tableau 14

CGS_{cg} = 0.66

Le reste des calculs est fourni à la figure 16. La valeur U globale de cette fenêtre est de 1.57 W/(m^2*C) et son CGS, de 0.49.

Figure 16 Exemple de calcul 2
FEUILLE DE CALCUL DE LA VALEUR U ET DU CGS GLOBAUX DES FENÊTRES

ÉTAPE 1 VALEUR U DE LA FENÊTRE

I Valeur U du centre du vitrage selon le tableau 5
Valeur U du centre du vitrage — 0.96

II Constantes de valeur U de la bordure du vitrage selon le tableau 6
A = 0.769, B = 0.706, C = 0.033
$U_{eg} = A + B * U_{cg} + C * U_{cg}^2$ = — 1.48

III Valeur U du cadre selon les tableaux 8 à 11
Intercalaire métallique $U_{métal} = 3.25$ —
Intercalaire isolant $U_{isol} = 2.65$ —
Intercalaire de verre $0.50 * U_{métal} + 0.50 * U_{isol}$ = —
Interc. métal. + isol. $0.15 * U_{métal} + 0.85 * U_{isol}$ = 2.74

IV Fractions éléments
Hauteur du cadre et largeur et hauteur de la fenêtre (mm)
Largeur de la fenêtre, W = 900, Hauteur, H = 1500
Hauteur du cadre = 58.4, selon les tableaux 8 à 11
Fraction cadre
Fenêtres fixes et à charnières
$F_{fr} = [(W * H) - (W - 2 * H_{fr}) * (H - 2 * H_{fr})] / (W * H)$ —
Fenêtres coulissant verticalement
$F_{fr} = [(W * (H/2)) - (W - 2 * H_{fr}) * ((H/2) - 2 * H_{fr})] / (W * (H/2)) * H)$ — 0.27
Fenêtres coulissant horizontalement
$F_{fr} = [((W/2) * H) - ((W/2) - 2 * H_{fr}) * (H - 2 * H_{fr})] / ((W/2) * H)$ —
Fraction centre du vitrage
Fenêtres fixes et à charnières
$F_{cg} = [(W - 2 * H_{fr} - 127) * (H - 2 * H_{fr} - 127)] / (W * H)$ —
Fenêtres coulissant verticalement
$F_{cg} = [(W - 2 * H_{fr} - 127) * ((H/2) - 2 * H_{fr} - 127)] / (W * (H/2))$ — 0.49
Fenêtres coulissant horizontalement
$F_{cg} = [((W/2) - 2 * H_{fr} - 127) * (H - 2 * H_{fr} - 127)] / ((W/2) * H)$ —
Fraction bordure du vitrage
$F_{eg} = 1 - F_{cg} - F_{fr}$ — 0.24

V Valeur U de la fenêtre
$U_{total} = U_{cg} * F_{cg} + U_{eg} * F_{eg} + U_{fr} * F_{fr}$ — 1.57

ÉTAPE 2 CALCUL DU CGS

I CGS du centre du vitrage selon le tableau 14
CGS_{cg} — 0.66

II CGS du cadre
$CGS_{fr} = 0.015 * 0.9 * U_{fr}$ = — 0.04

III CGS de la fenêtre
$CGS_{total} = CGS_{cg} * (F_{cg} + F_{eg}) + CGS_{fr} * F_{fr}$ = — 0.49

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Nous pouvons tirer les conclusions suivantes des données contenues dans le présent rapport.

L'écart moyen entre les valeurs U globales des fenêtres simulées par VISION/FRAME et mesurées par le CNRC était de 2.4 % pour les 13 fenêtres analysées. Les prédictions des pertes thermiques du cadre et de la bordure du vitrage par le logiciel FRAME se situent toutes à l'intérieur de la marge d'incertitude des résultats d'essai du CNRC. Les estimations de ce logiciel semblent donc raisonnablement fiables.

Les pertes de chaleur de la plupart des cadres de fenêtres peuvent être divisées en catégories représentatives si elles sont normalisées selon la surface projetée du cadre. Les valeurs U des cadres de fenêtre tout en aluminium dépendent davantage de l'aire de surface que de la surface projetée, mais devraient être basées sur la surface projetée par souci d'uniformité.

Les cadres d'aluminium avec et sans coupure thermique ont, en général, des coefficients de perte thermique supérieurs à ceux des cadres de bois, de vinyle et de fibre de verre. Les cadres de fenêtre à charnières et coulissantes à châssis sans traverses ont généralement des valeurs U inférieures à celles des cadres de fenêtres coulissantes et fixes. Le type d'intercalaire utilisé à l'intérieur du vitrage scellé a un effet considérable sur les pertes de chaleur par le cadre.

La variation du CGS du centre du vitrage en fonction de la température extérieure, de l'intensité du rayonnement solaire et du coefficient d'échange superficiel extérieur était inférieur à un pour cent pour une vaste plage de valeurs de chacun des paramètres étudiés. De ce fait, n'importe quel jeu de conditions normalisées peut être choisi pour l'évaluation énergétique des fenêtres résidentielles.

Le CGS fluctue en fonction de l'angle d'incidence; toutefois, l'écart entre différents types de vitrages est faible pour les angles d'incidence

présentant un intérêt pratique. Une équation simple peut être utilisée pour calculer un coefficient d'angle d'incidence non perpendiculaire, au besoin, quel que soit le type de vitrage.

Le transfert de chaleur par le cadre et par la bordure du vitrage a peu d'effet sur le CGS des fenêtres à cadre de bois. L'effet du cadre et de la bordure du vitrage sur le CGS des fenêtres à cadre d'aluminium avec ou sans coupure thermique est inférieur à 5 %. Une équation simple peut servir à calculer le CGS du cadre en fonction de la valeur U de ce dernier.

6.2 Recommandations

Les recommandations découlant du présent rapport sont les suivantes :

- d'autres validations des valeurs U prédites par le logiciel FRAME sont requises, en particulier pour les types de cadres qui n'ont pas encore été analysés (un plus vaste éventail de fenêtres coulissantes et de fenêtres coulissantes à châssis sans traverses, par exemple); (Remarque : l'analyse d'autres types de fenêtres est déjà planifiée dans le cadre du projet de recherche canado-américain.)

- d'autres travaux sont nécessaires pour déterminer de quelle façon les valeurs U des cadres fournies dans le présent rapport pourraient être utilisées dans un programme d'étiquetage de performance des fenêtres (c.-à-d. comment interpoler et extrapoler les résultats à d'autres types de fenêtres); et

- la méthode de calcul du CGS global des fenêtres devrait être comparée à des résultats expérimentaux lorsque ceux-ci seront disponibles.

7. OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

Arasteh, D. 1989, "An Analysis of Edge Heat Transfer in Residential Windows", Proceedings of the BTECC IV Conference, Orlando, December 1989.

ASHRAE 1989, ASHRAE Handbook--1989 Fundamentals, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Baker, J.A., Sullivan, H.F., and Wright, J.L. 1989, "A Study of Pane Spacing in Glazing Systems", Solar Energy Society of Canada (SESCI) Conference, Penticton, B.C., June 1989, p.p. 267-272.

Carpenter, S., and McGowan, A. 1989, "Frame and Spacer Effects on Window U-values", ASHRAE Transactions, Vol. 95, Part 1.

Dubrous, F., and Harrison, S. 1989, "Comparison of Experimental Test Results and Analytical Calculations of Window Thermal Performance", ASHRAE Transactions, Vol. 95, Part 2.

Duffie, J.A., and Beckman, W.A. 1980, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons Inc.

Elmahdy, A.H., and Bowen, R.P. 1988, "Laboratory Determination of the Thermal Resistance of Glazing Units", ASHRAE Transactions, Vol. 94, Part 2.

Elmahdy, A.H. 1990, "Joint Canadian/U.S. Research Project on Window Performance: Project Outline and Preliminary Results", ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part 1.

Enermodal Engineering Limited 1987, The Effect of Frame Design on Window Heat Loss - Phase I, Report prepared for Energy, Mines and Resources Canada.

Enermodal Engineering Limited 1989, FRAME: Logiciel d'analyse par la méthode de différences finies pour évaluer le comportement thermique des cadres de fenêtres - Version 2.0, décembre 1989.

Enermodal Engineering Limited 1990, FRAME/VISION Window Performance Modelling and Sensitivity Analysis, Report prepared for the Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada.

Hogan, J.F. 1990, "An Evaluation of the Representativeness of Glazing Product U-Values in the ASHRAE 1989 Fundamentals Volume", ASHRAE Transactions, Vol. 96, Part 1.

LBL 1988, WINDOW 3.1 Users and Référence Guide, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.

Ortech International 1990, "Preliminary Study of Energy Performance Evaluation and Labelling Requirements for Windows", prepared for Energy, Mines and Resources Canada, Efficiency & Alternative Energy Technology Branch, February, 1990.

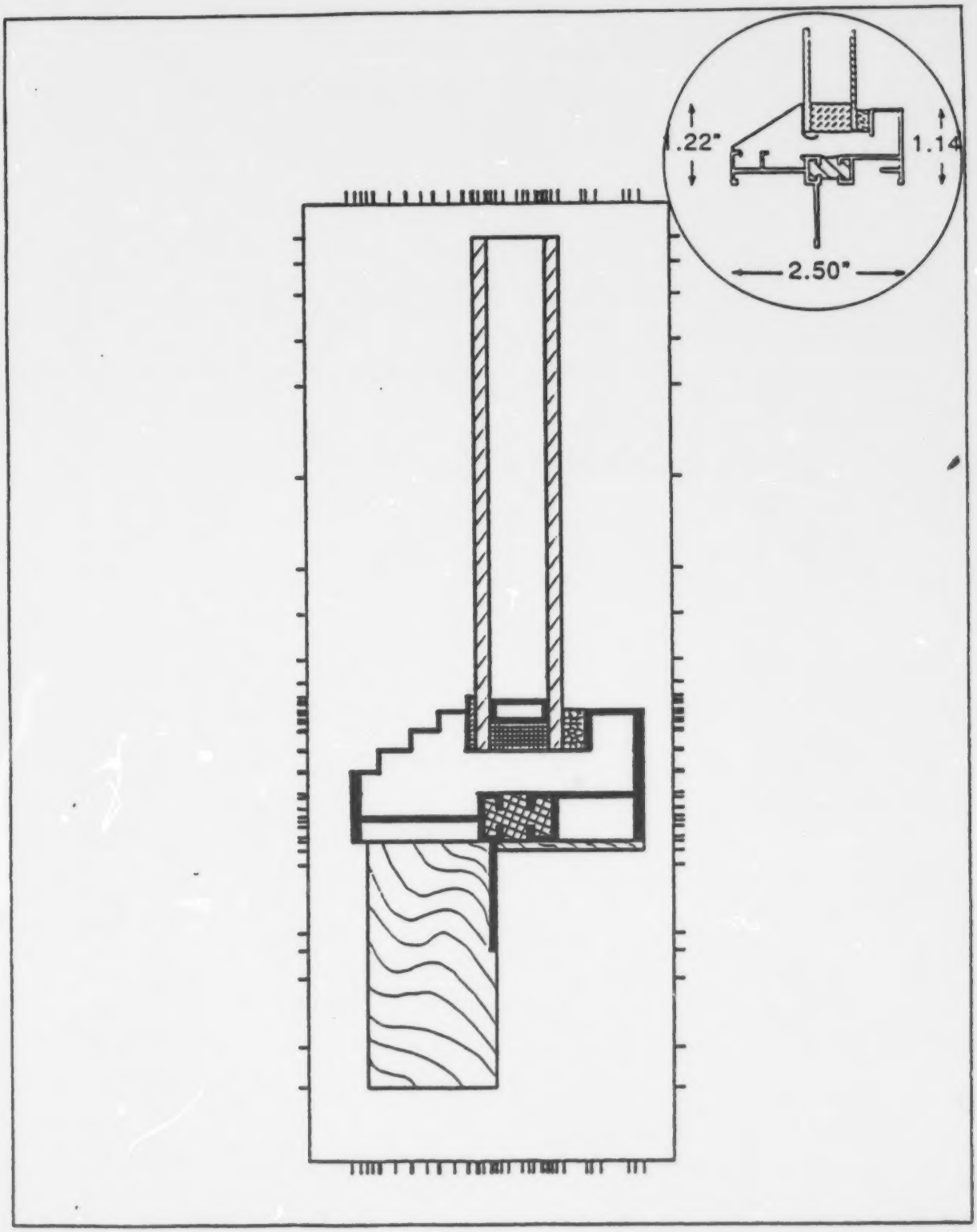
University of Waterloo 1989, "VISION: A Computer Program to Evaluate the Thermal Performance of Innovative Glazing Systems", March 1989.

Wright, J.L. 1990, communication personnelle, novembre 1990.

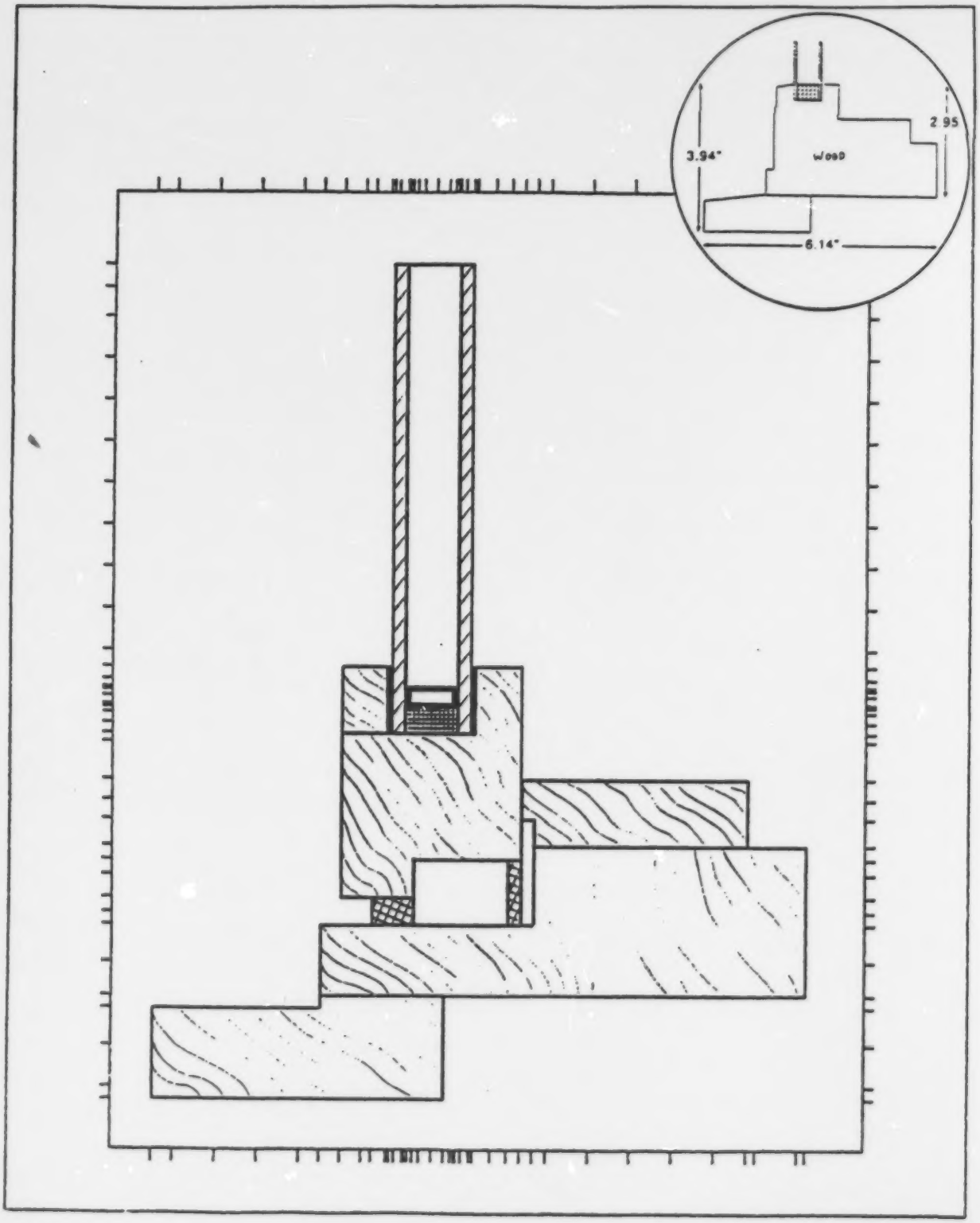
Wright, J.L. and Sullivan, H.F. 1987, "Simulation and Measurement of Windows with Metal Films Used in Conjunction with Teflon Inner Glazings", International Conference on Building Energy Management, Lausanne, Switzerland, September, 1987.

ANNEXE A : COUPES DE FENETRES UTILISÉES POUR LE PROJET DE RECHERCHE CANADA-AMÉRICAIN

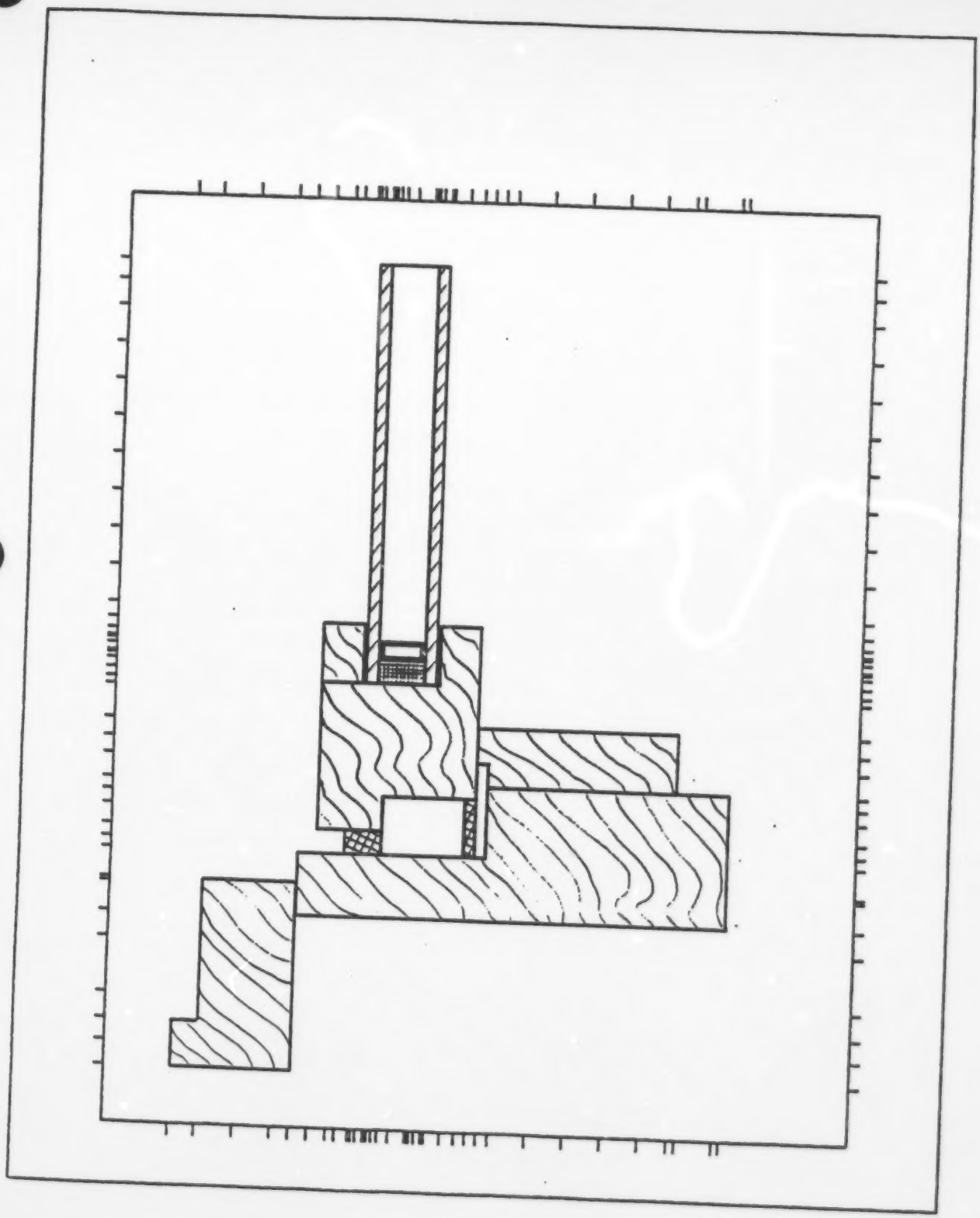
REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 1



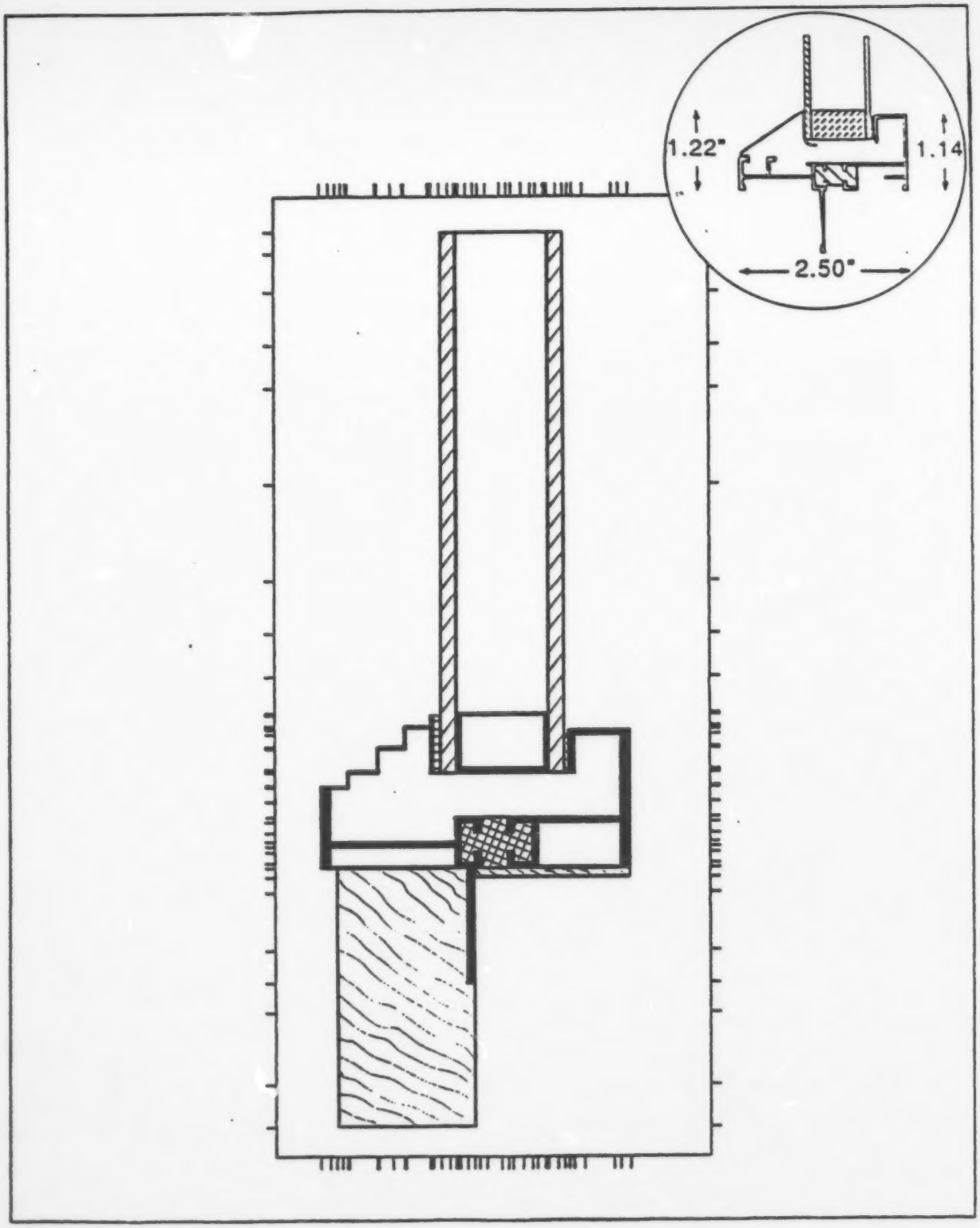
REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 2 (SEUIL)



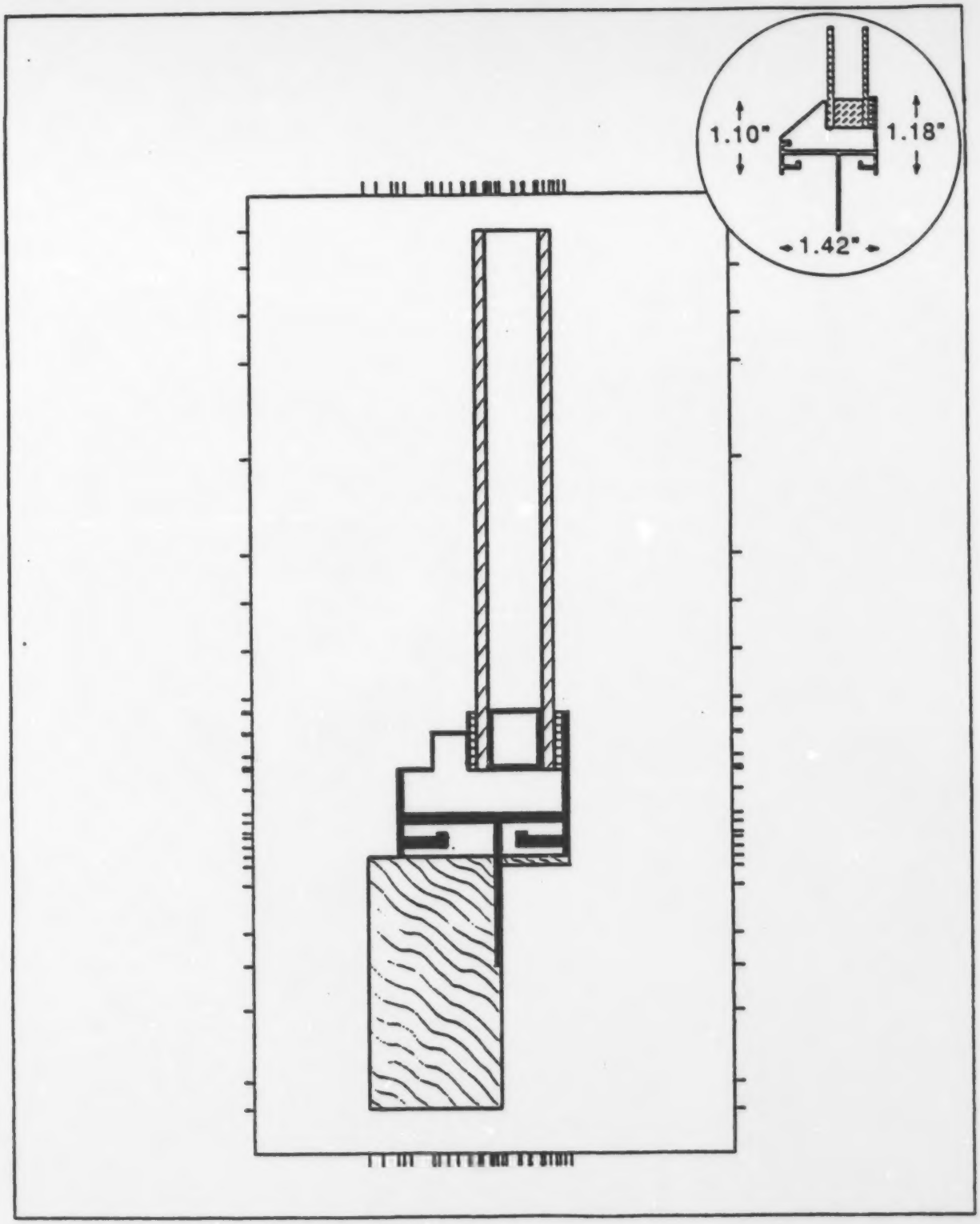
REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 2
(TRAVERSE SUPÉRIEURE/MONTANT)



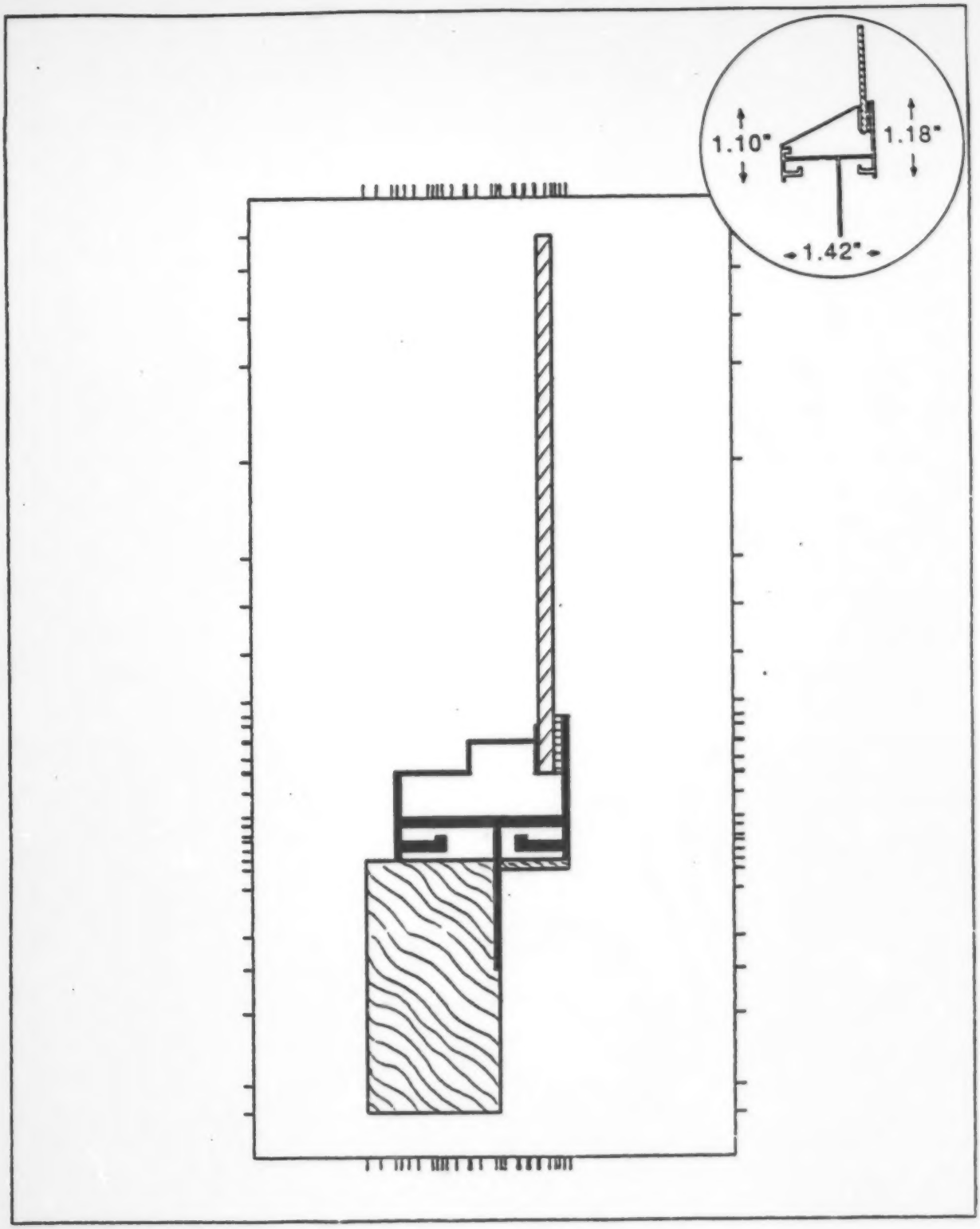
REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 3



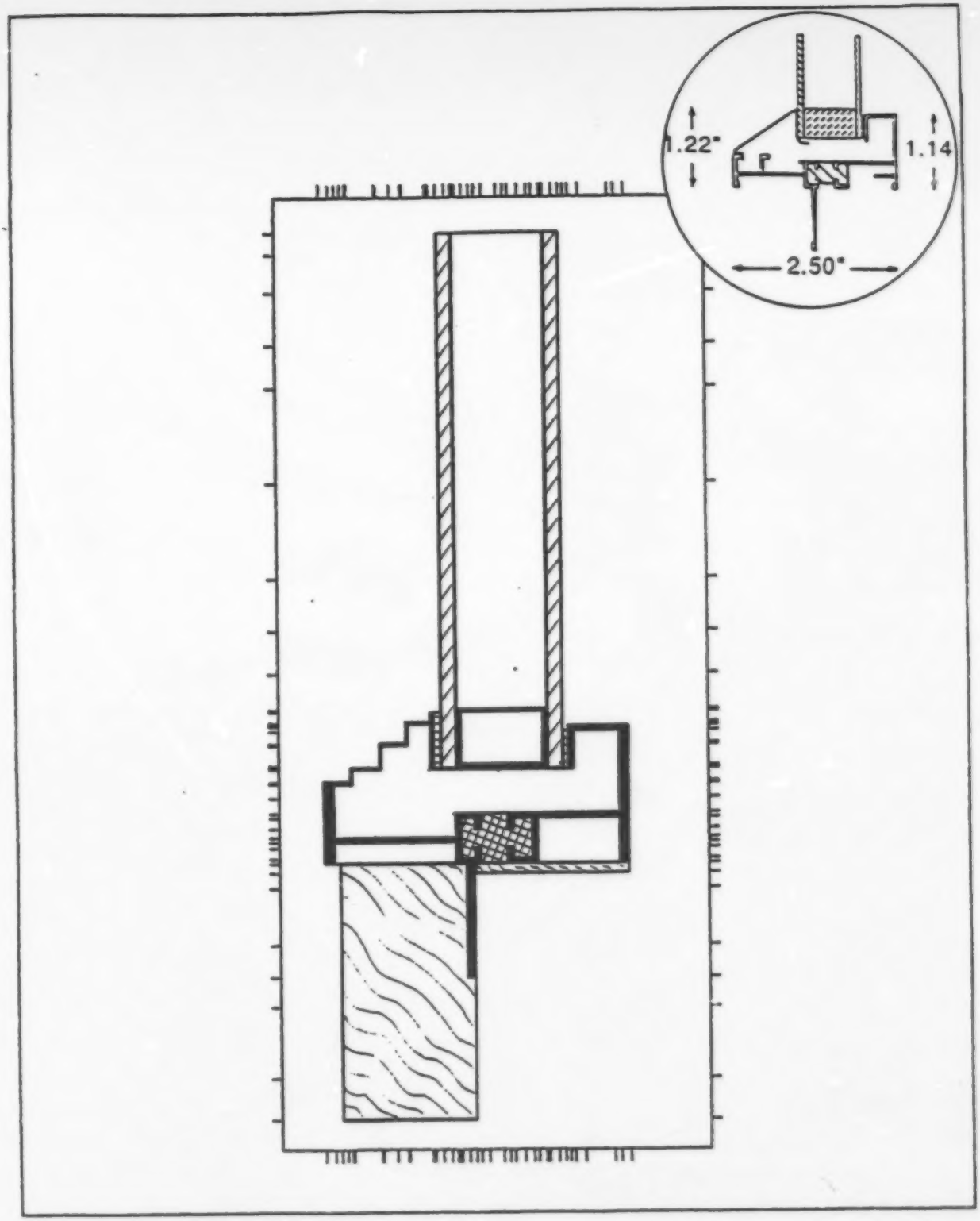
REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 4



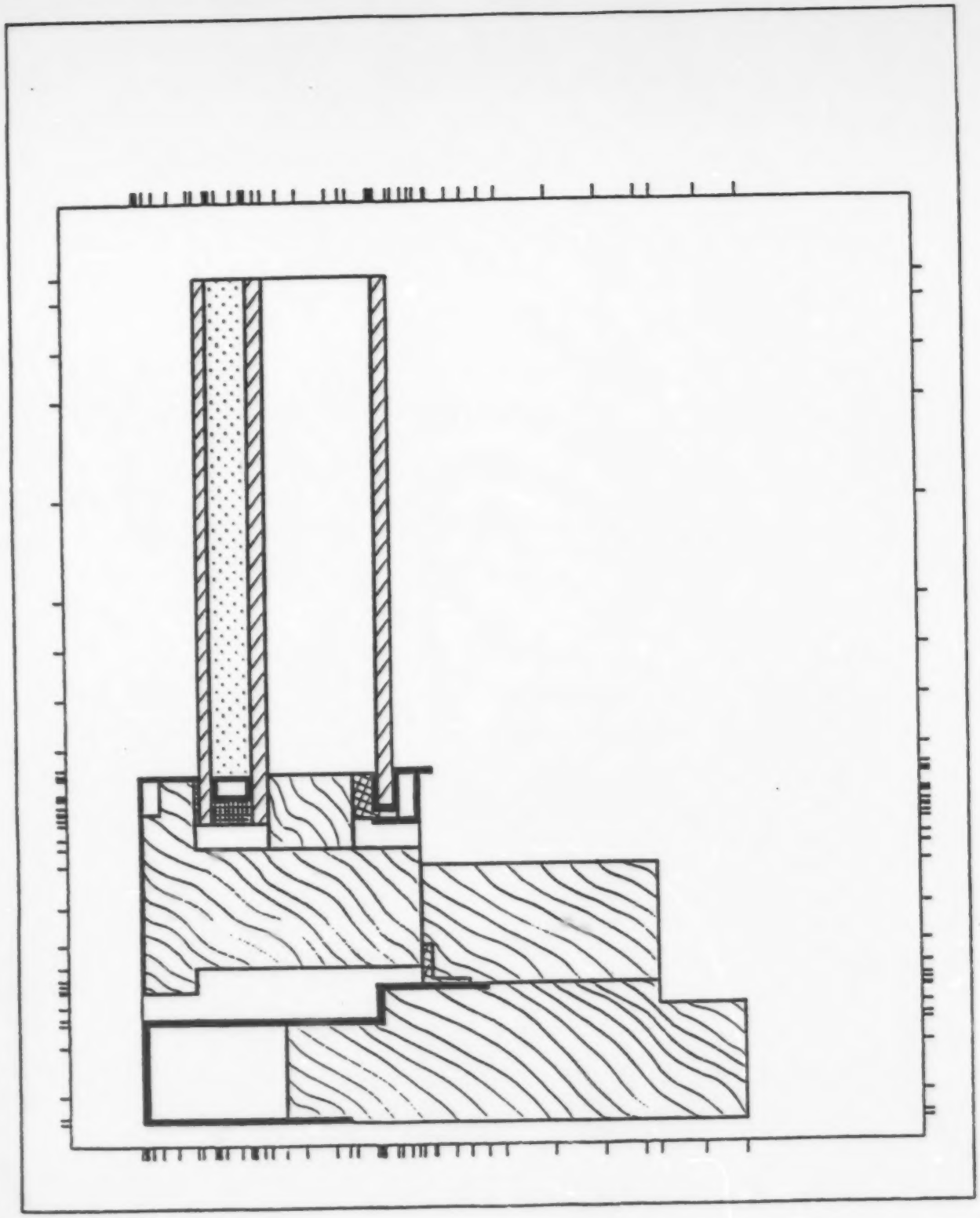
REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 5



REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 6



REPRÉSENTATION FRAME DE LA FENETRE N° 7

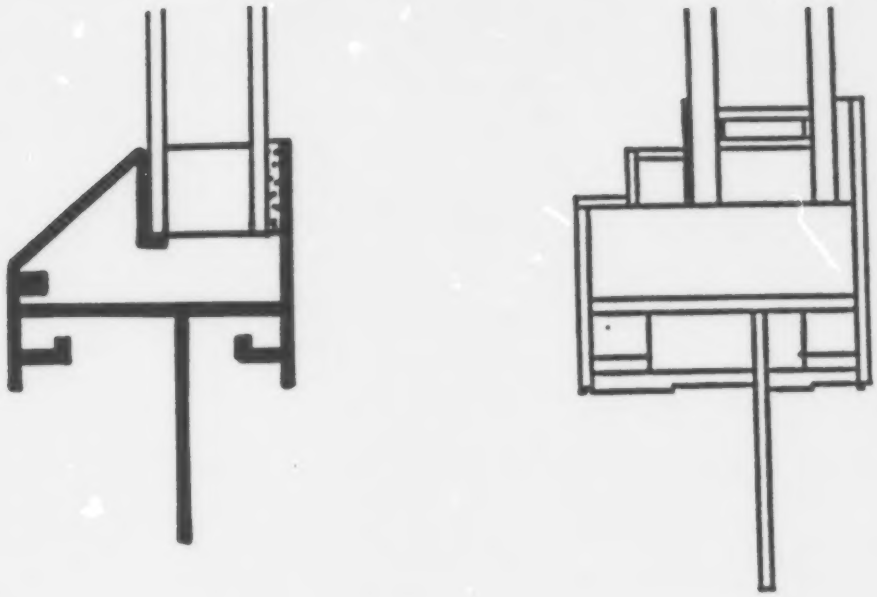


ANNEXE B.1 : COUPES DE FENETRES FIXES

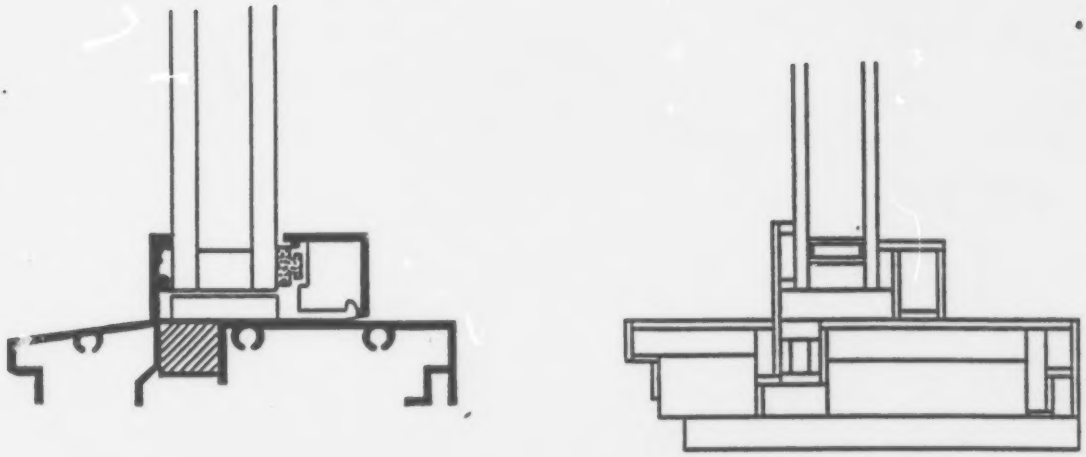
Remarques :

1) Coupe réelle à gauche, représentation FRAME à droite.

2) Légende des matériaux :

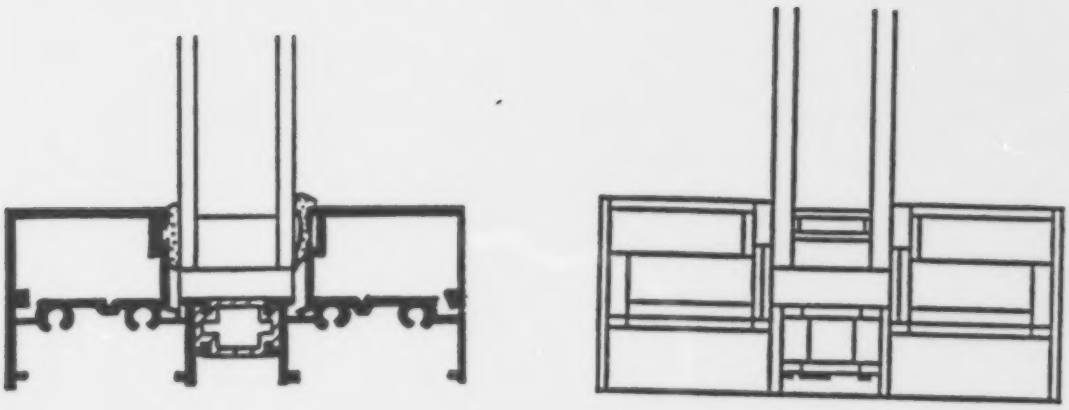


Cadre de fenêtre fixe en aluminium - P1

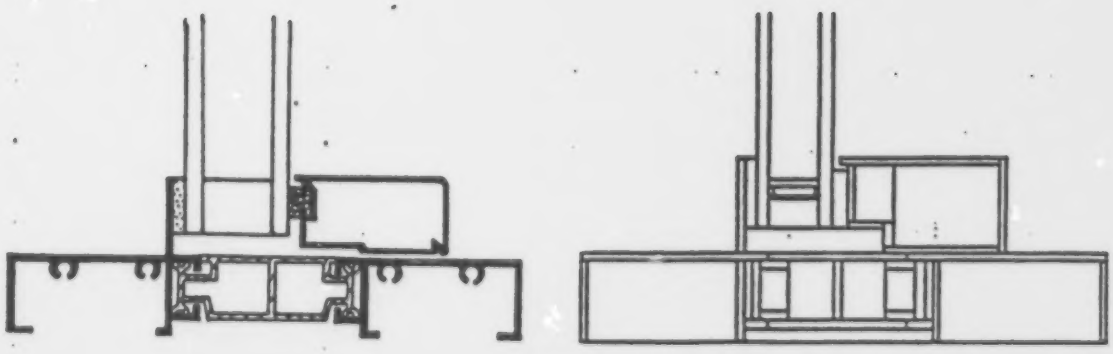


Cadre de fenêtre fixe en aluminium avec coupure thermique de 5 mm - P3

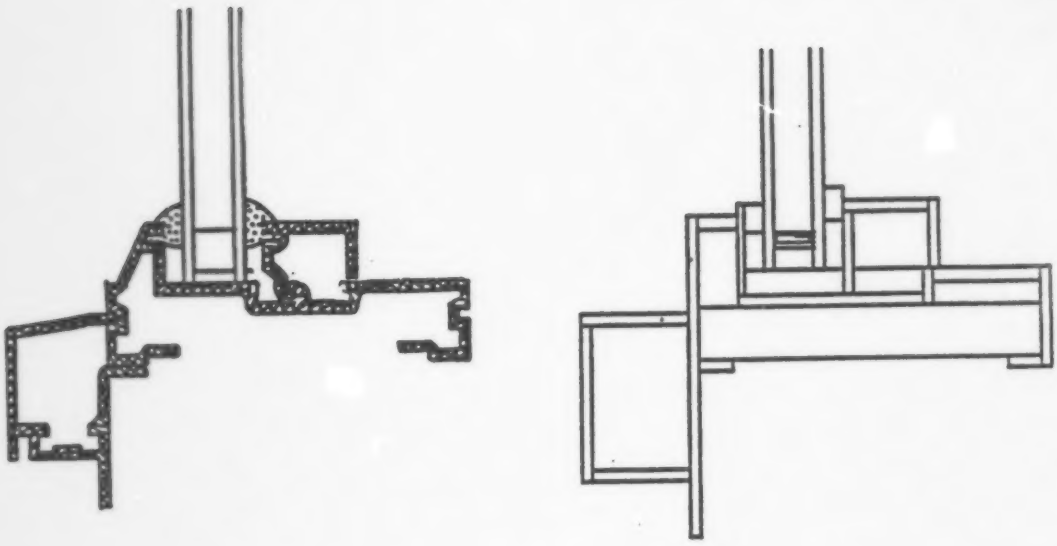
Cadre de fenêtre fixe en aluminium sans coupure thermique - P2



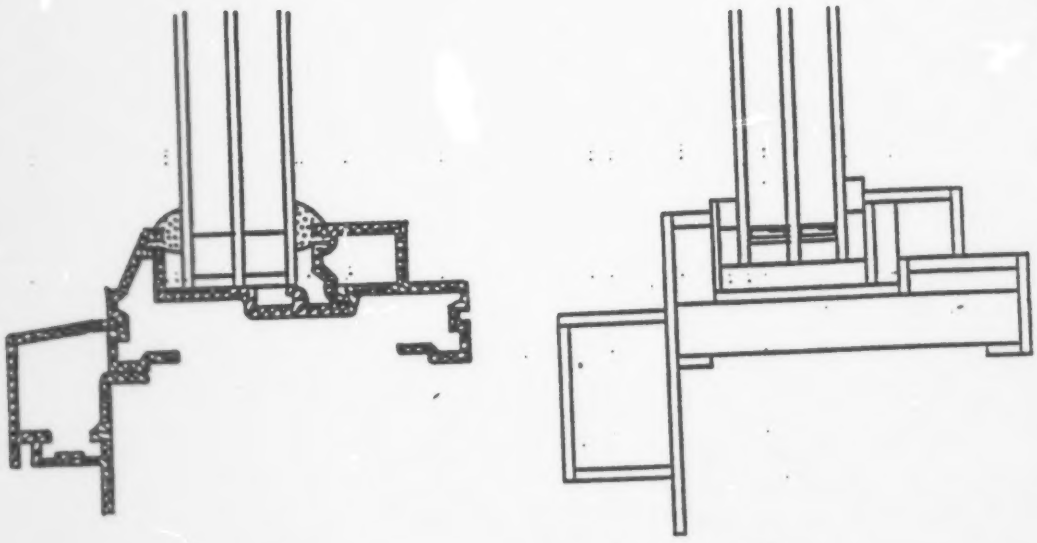
Cadre de fenêtre fixe en aluminium avec coupure thermique de 9 mm - P4



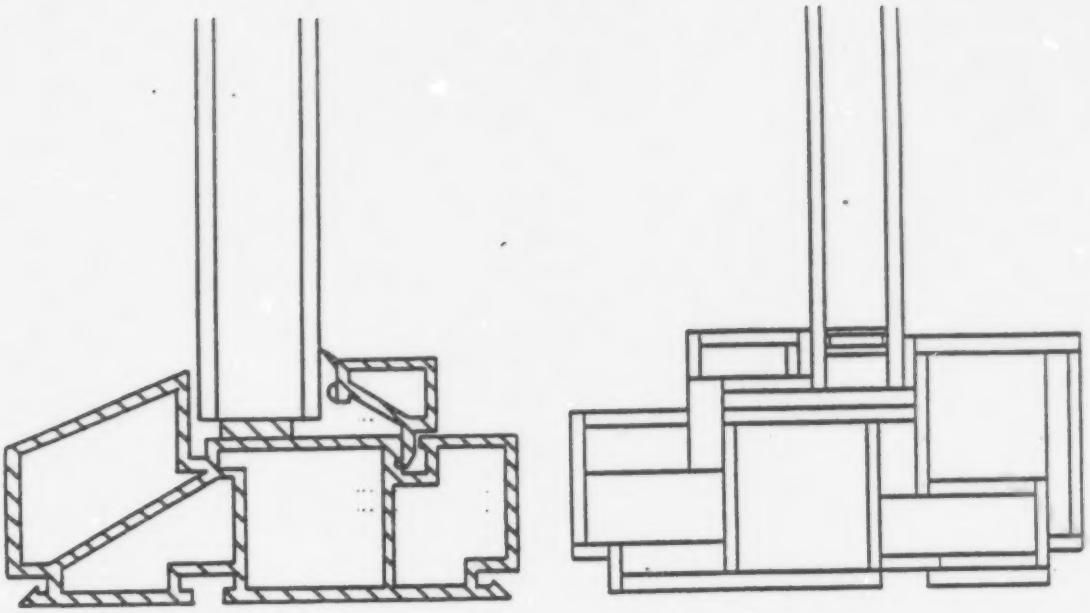
Cadre de fenêtre fixe en aluminium avec coupure thermique de 33 mm - P5



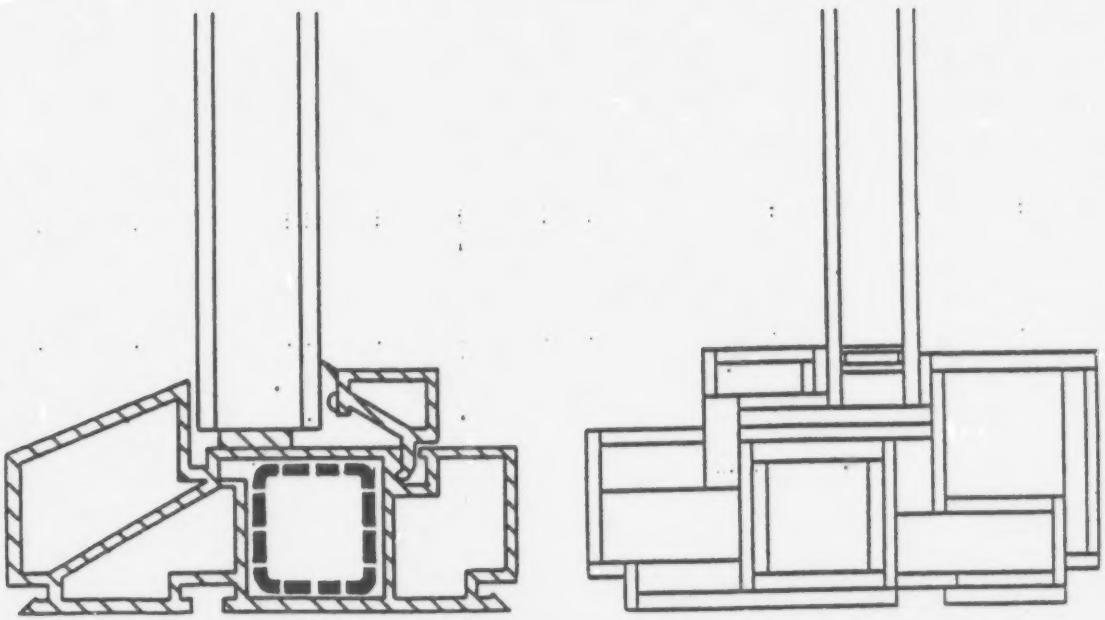
Cadre de fenêtre fixe en fibre de verre : double vitrage - P6



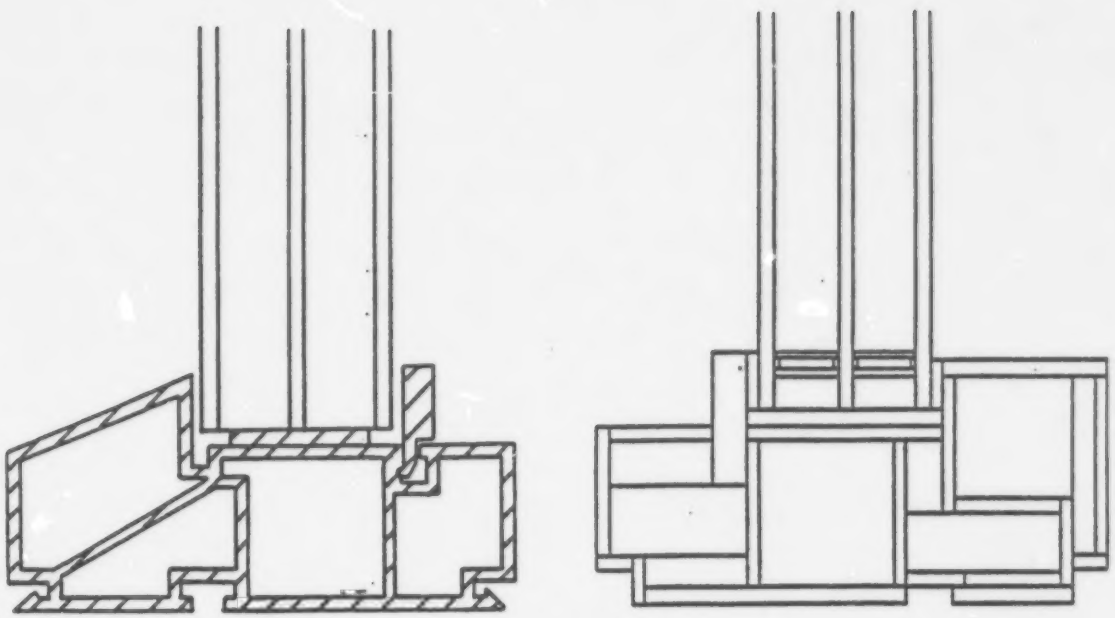
Cadre de fenêtre fixe en fibre de verre : triple vitrage - P7



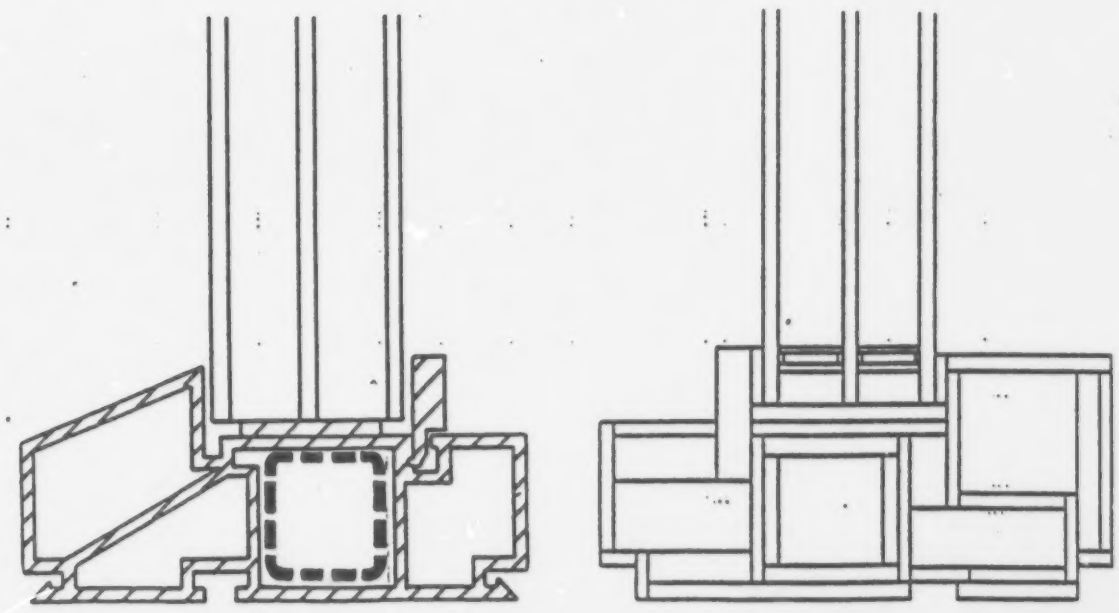
Cadre de fenêtre fixe en vinyle : double vitrage - P8



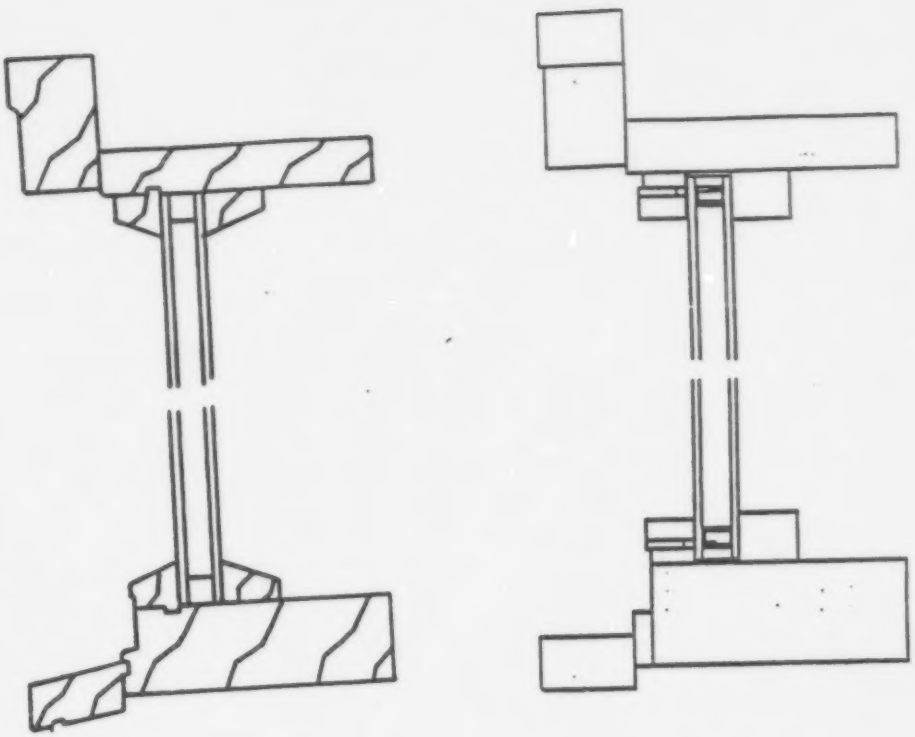
Cadre de fenêtre fixe en vinyle renforcé : double vitrage - P10



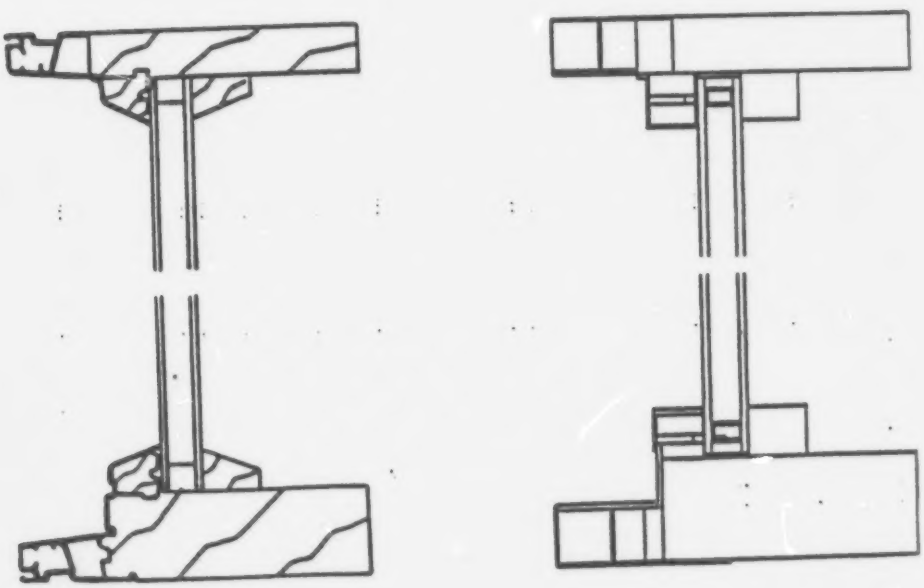
Cadre de fenêtre fixe en vinyle : triple vitrage - P9



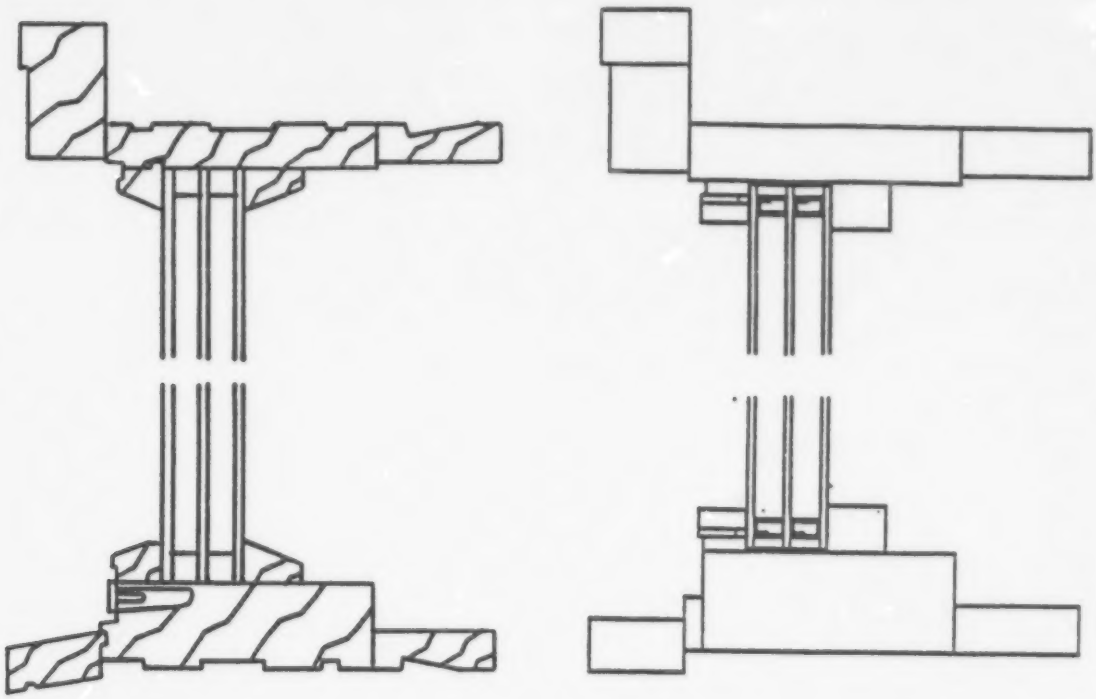
Cadre de fenêtre fixe en vinyle renforcé : triple vitrage - P11



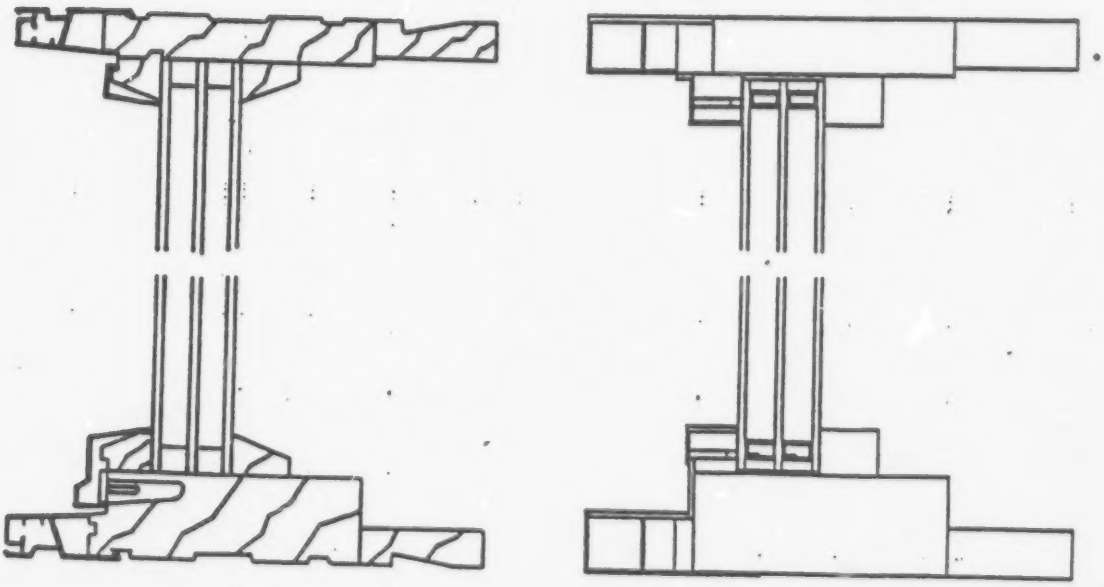
Cadre de fenêtre fixe en bois : double vitrage - P12



Cadre de fenêtre fixe en bois revêtu d'aluminium : double vitrage - P13



Cadre de fenêtre fixe en bois : triple vitrage - P14



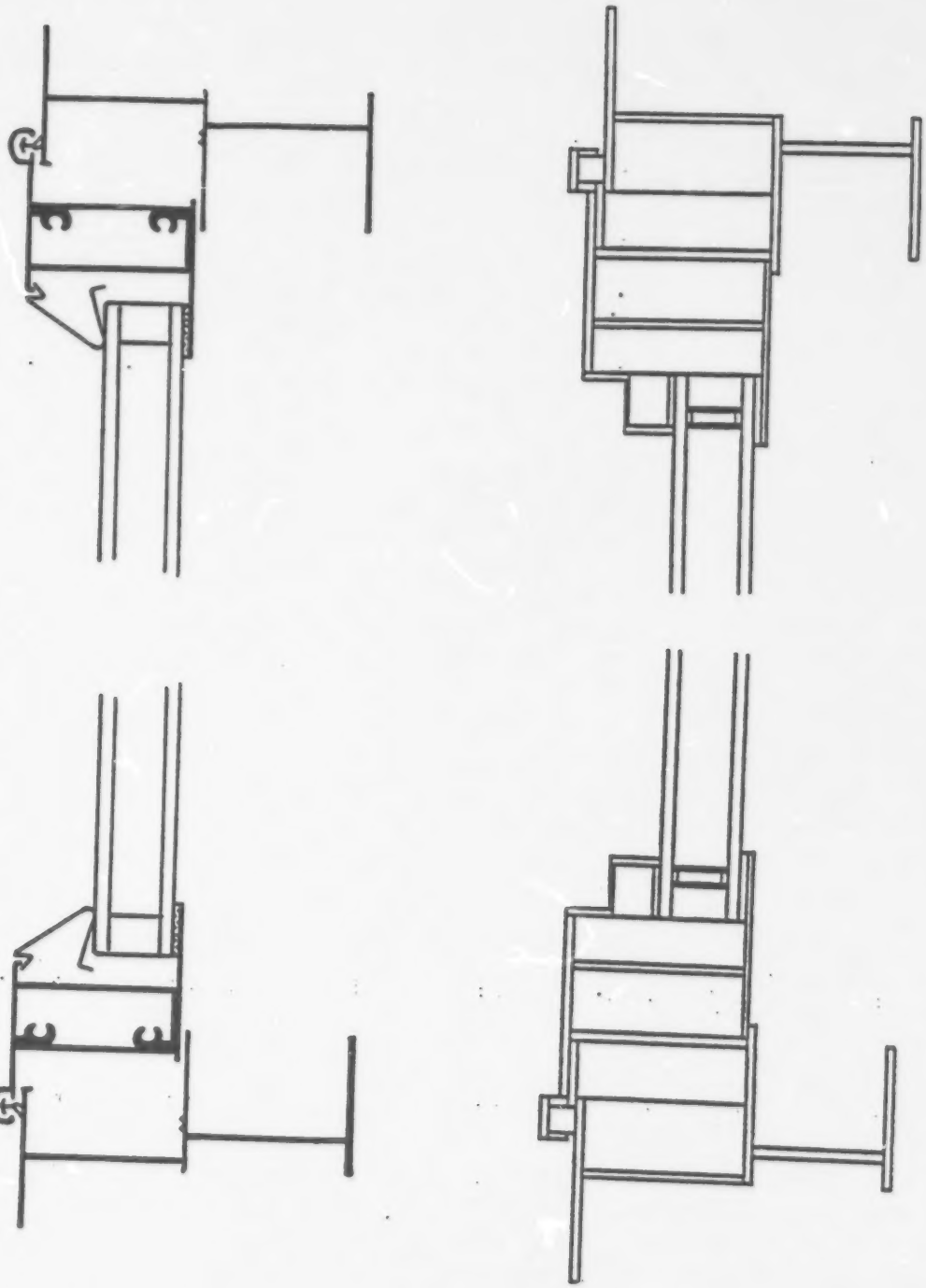
Cadre de fenêtre fixe en bois revêtu d'aluminium : triple vitrage - P15

ANNEXE B.2 : COUPES DE FENETRES A CHARNIERES

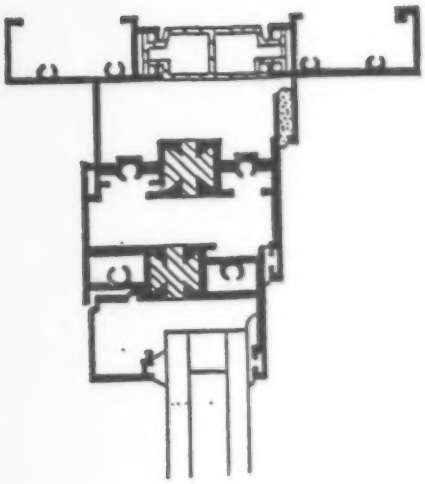
Remarques :

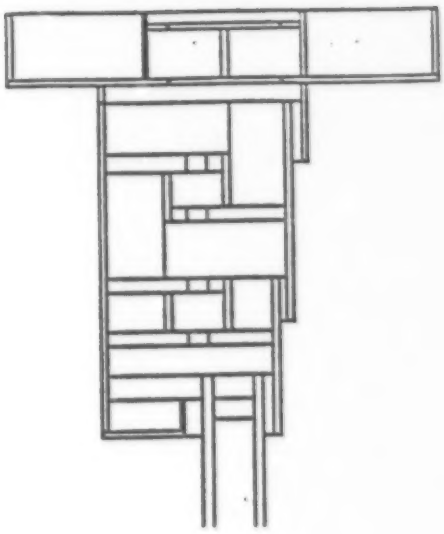
1) Coupe réelle à gauche, représentation FRAME à droite.

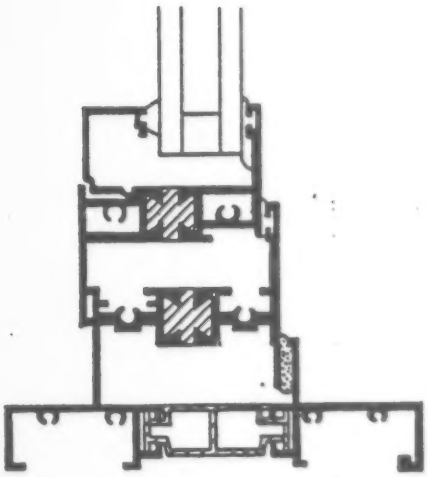
2) Légende des matériaux :

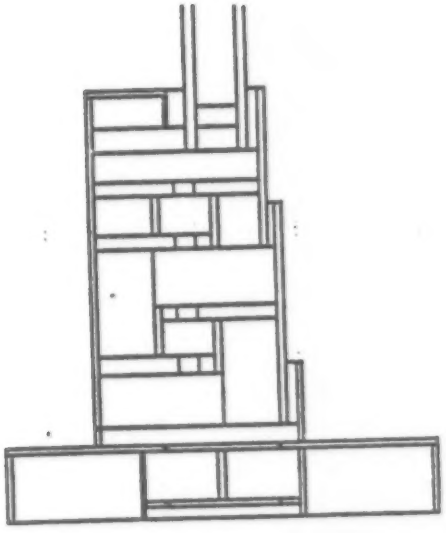


Cadre de fenêtre à charnières en aluminium - H1

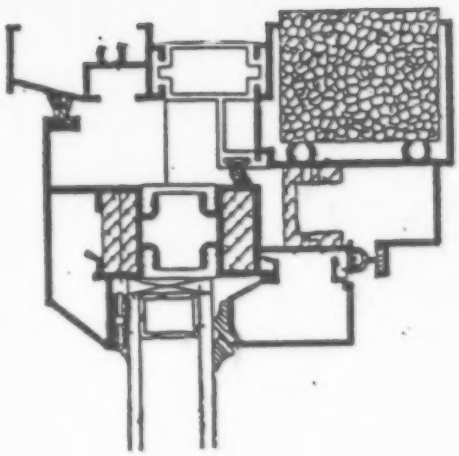


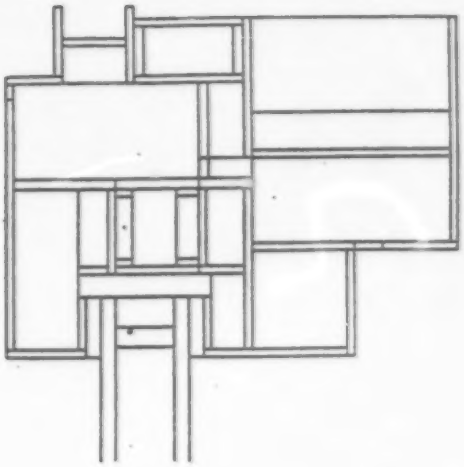


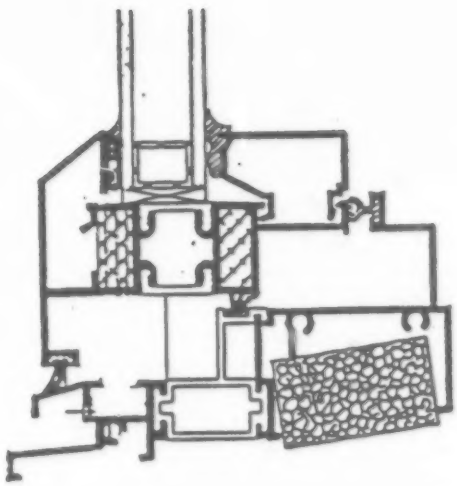


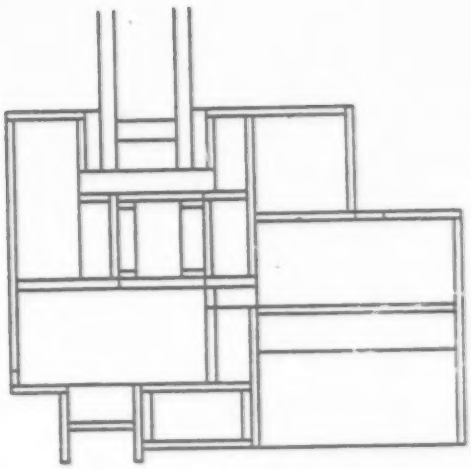


Cadre de fenêtre à charnières en aluminium avec coupure thermique de 5 mm - H2

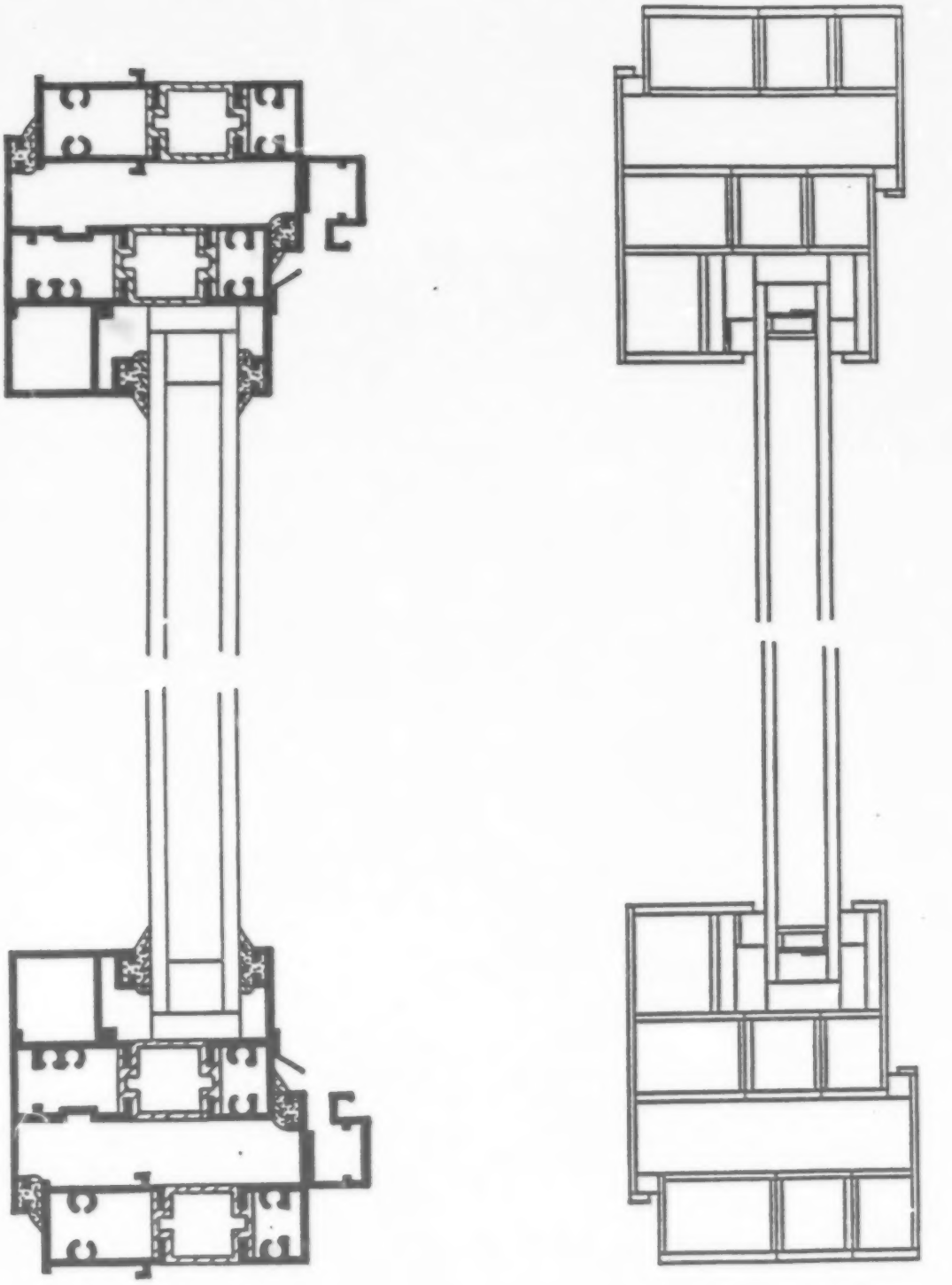




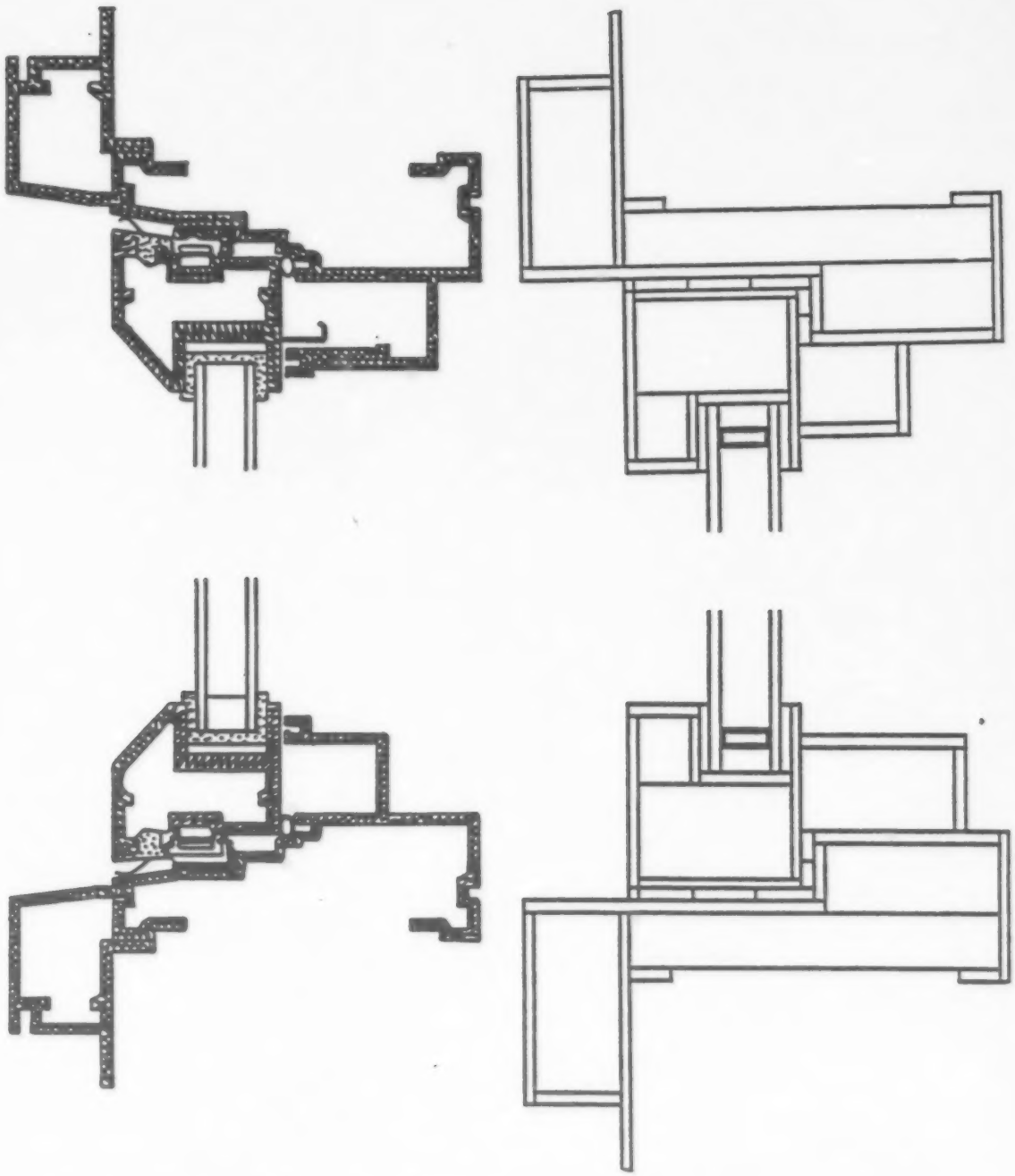




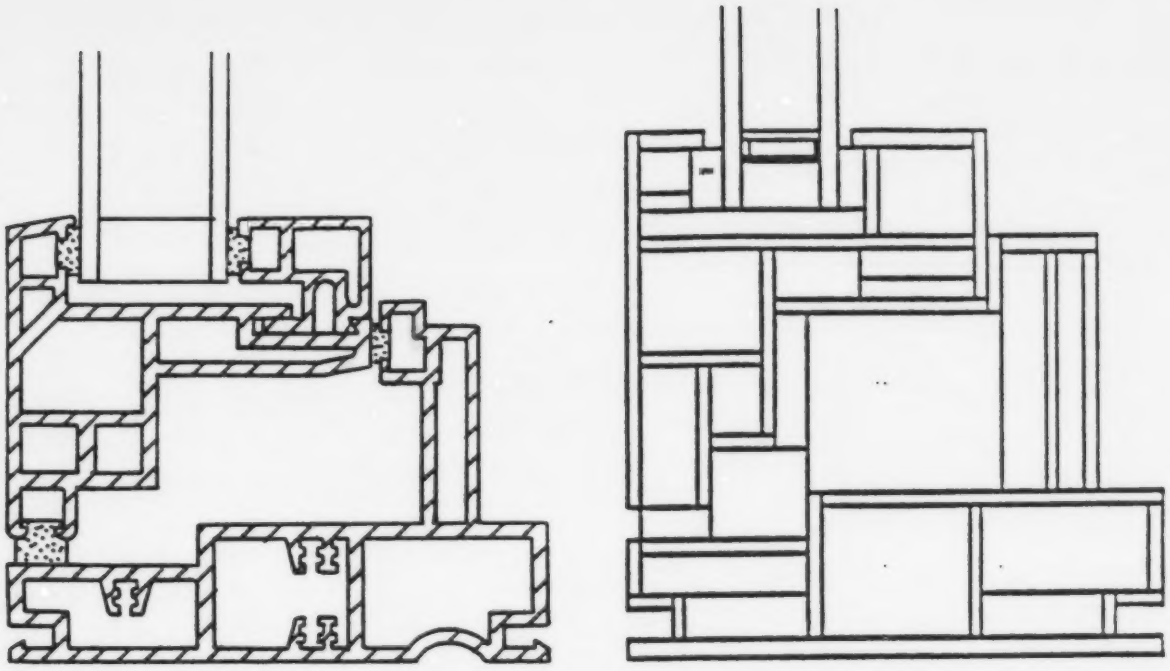
Cadre de fenêtre à charnières en aluminium avec coupure thermique de 9 mm - M3



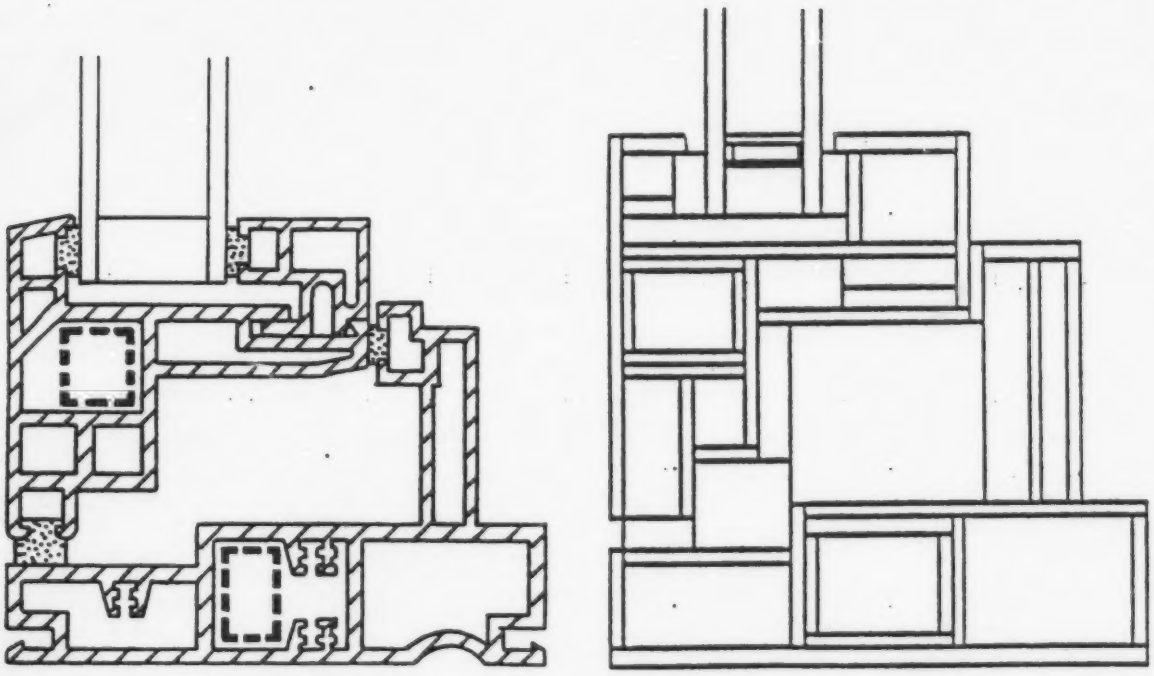
Cadre de fenêtre à charnières en aluminium avec coupure thermique de 18 mm - H4



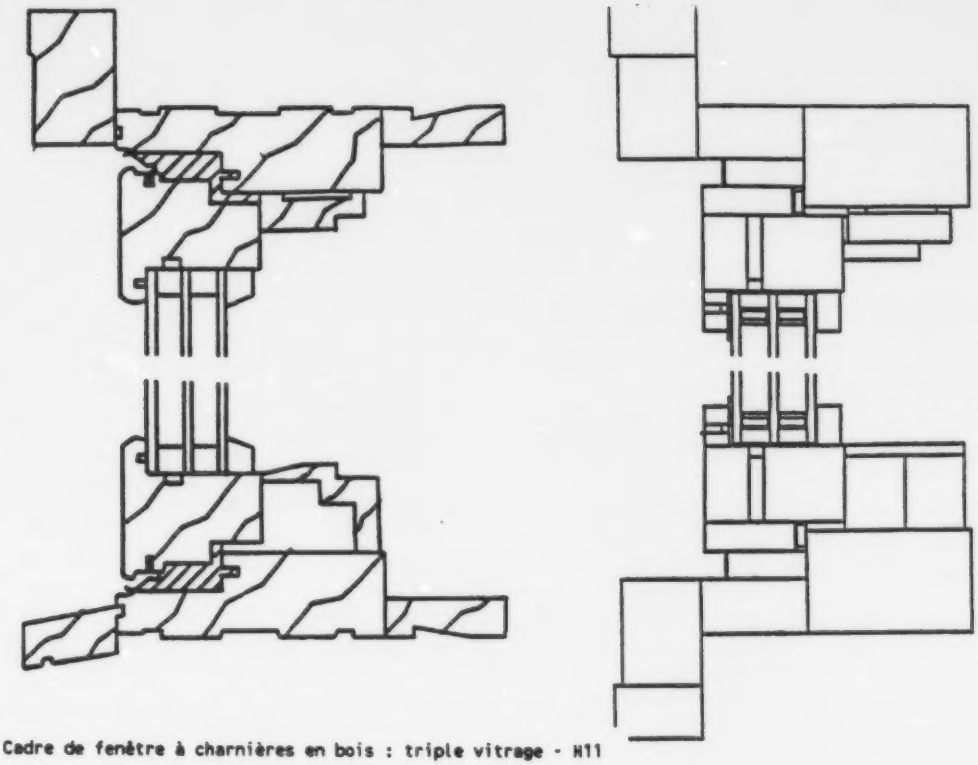
Cadre de fenêtre à charnières en fibre de verre - M5



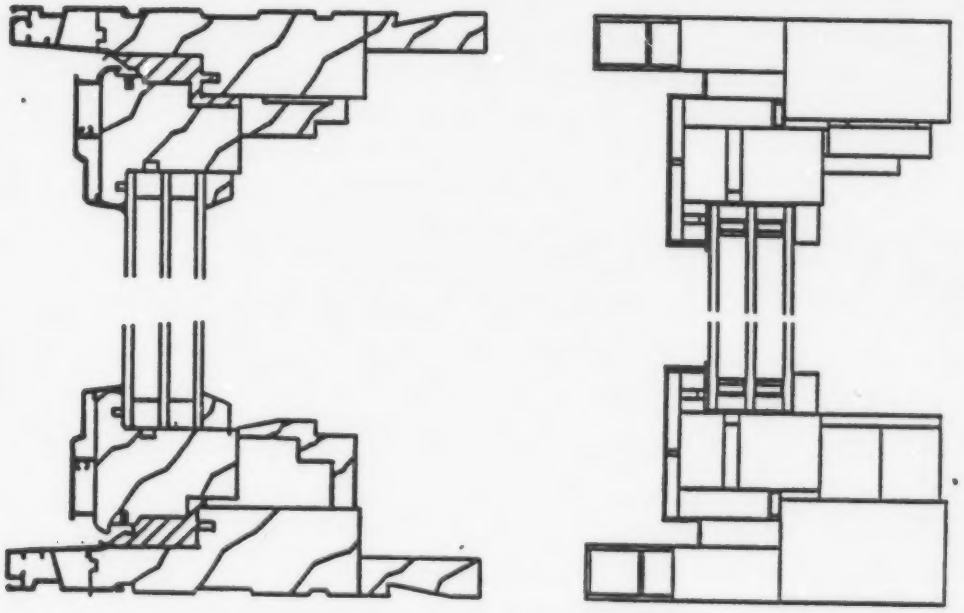
Cadre de fenêtre à charnières en vinyle : double vitrage - H6



Cadre de fenêtre à charnières en vinyle renforcé : double vitrage - H8



Cadre de fenêtre à charnières en bois : triple vitrage - H11



Cadre de fenêtre à charnières en bois revêtu d'aluminium : triple vitrage - H13

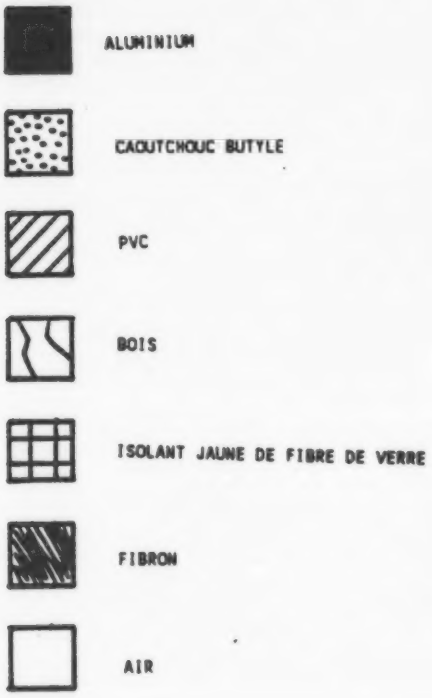
ANNEXE B.3 : COUPES DE FENETRES COULISSANTES

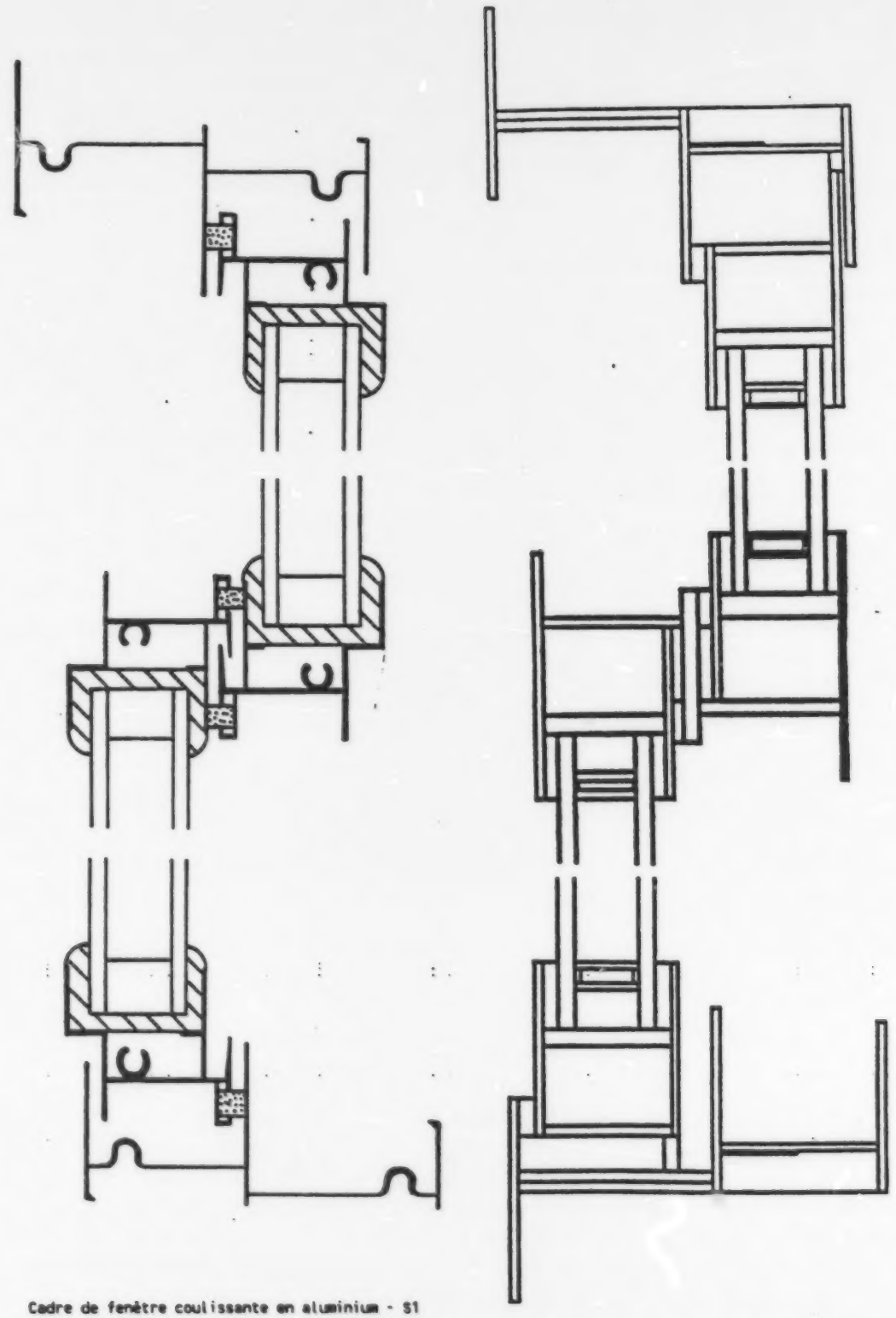
Remarques :

1) Coupe réelle à gauche, représentation FRAME à droite.

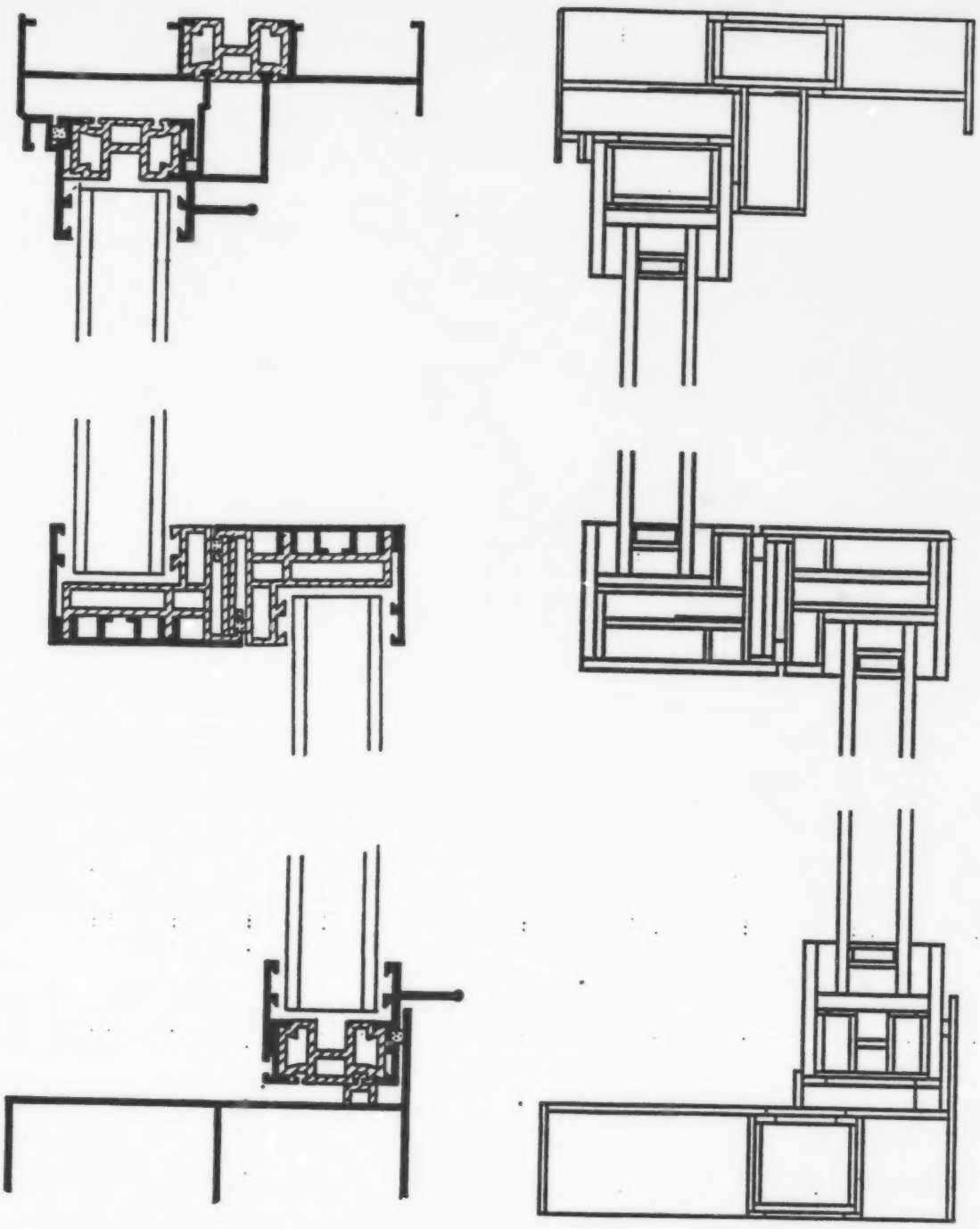
2) Toutes les fenêtres illustrées coulissent horizontalement.

3) Légende des matériaux :

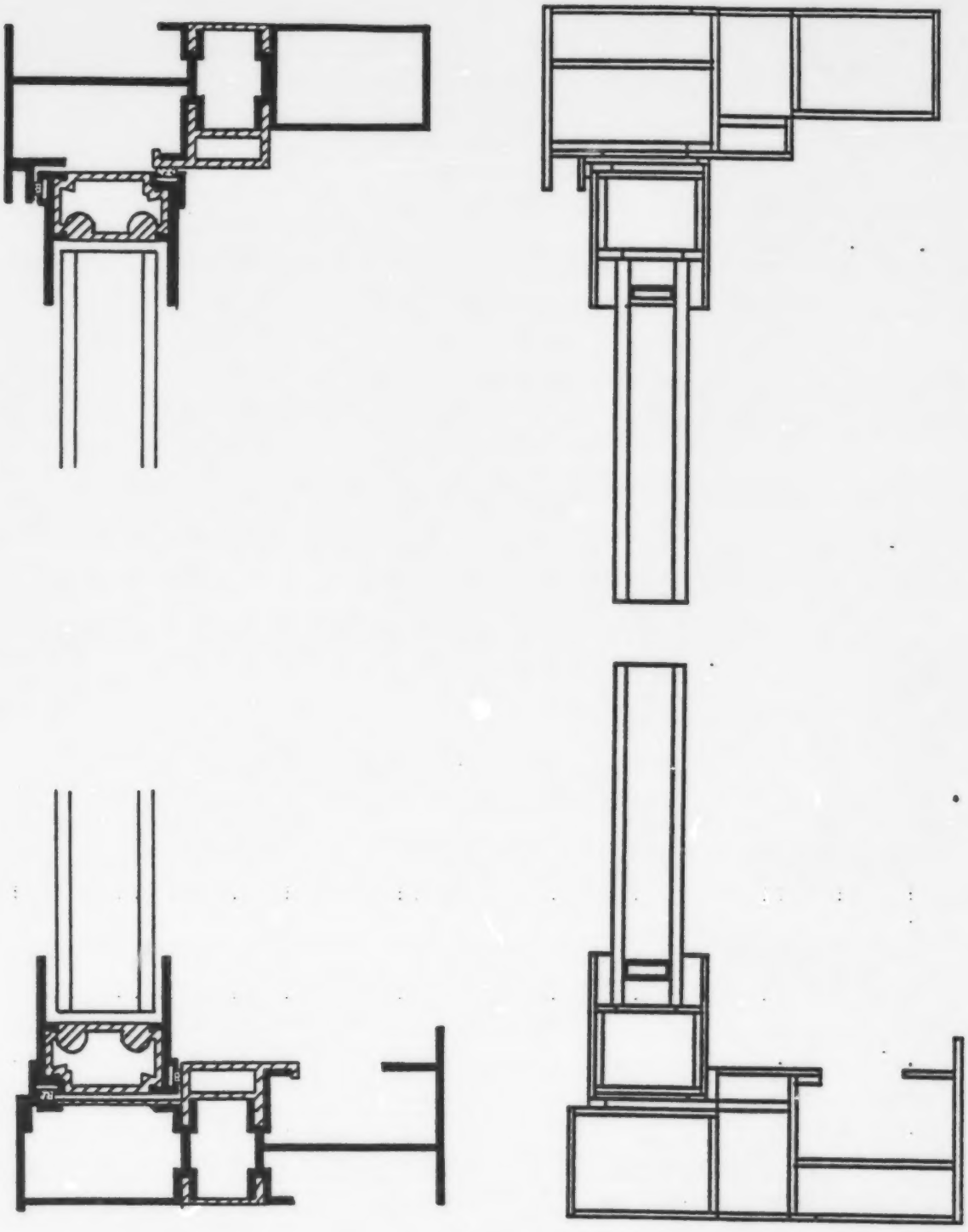




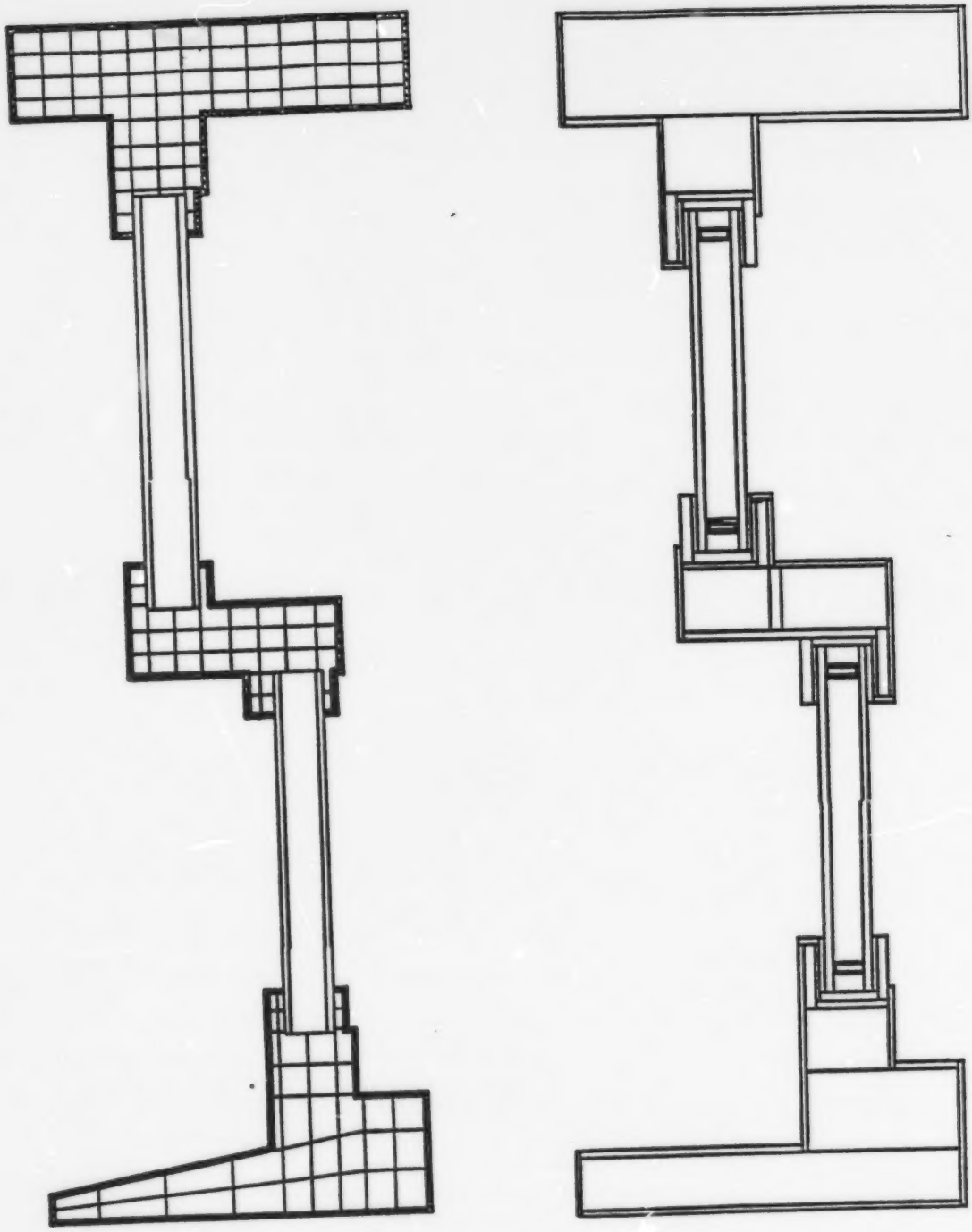
Cadre de fenêtre coulissante en aluminium - S1



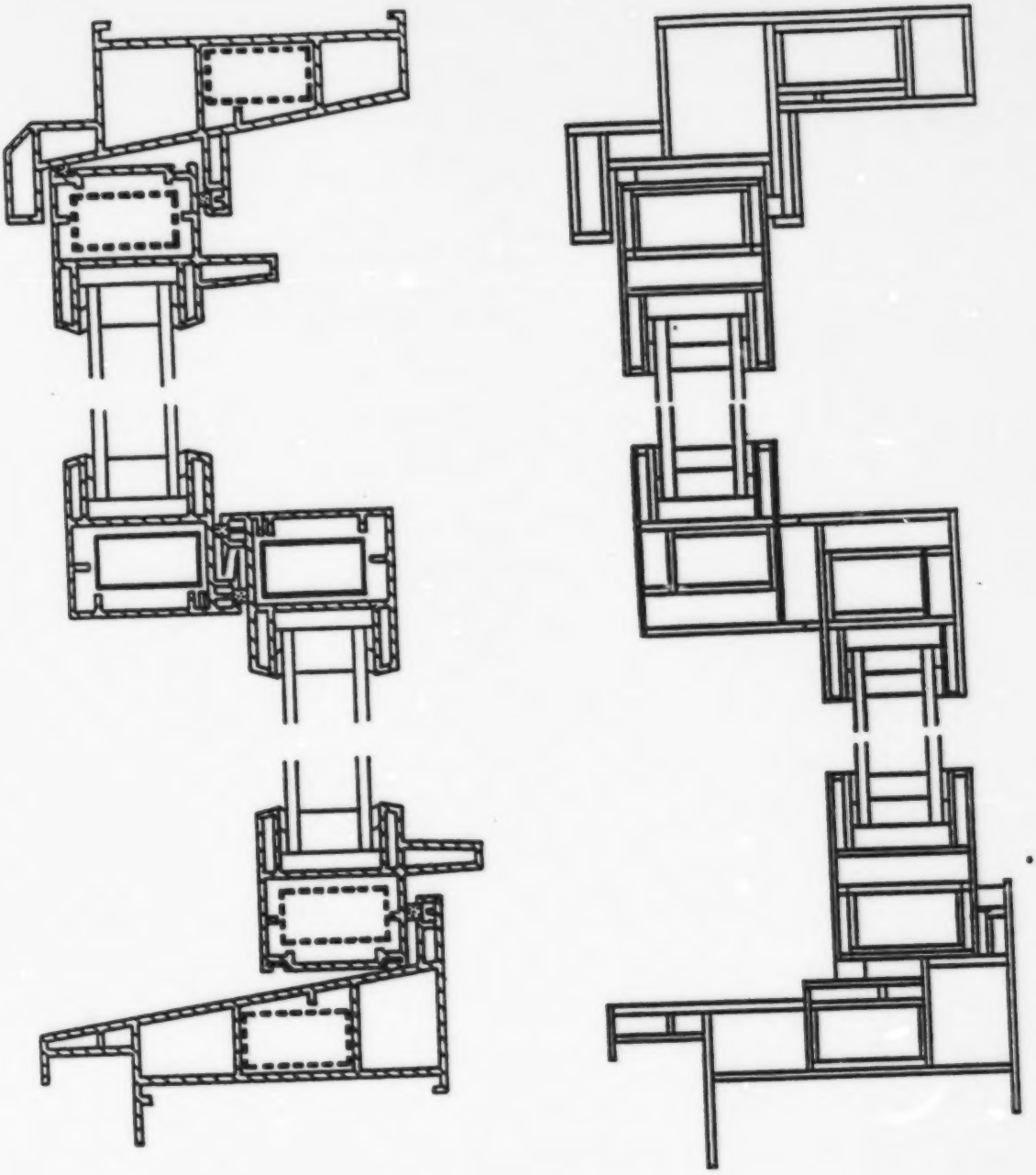
Cadre de fenêtre coulissante en aluminium avec coupure thermique de 20 mm (coupe horizontale) - S2



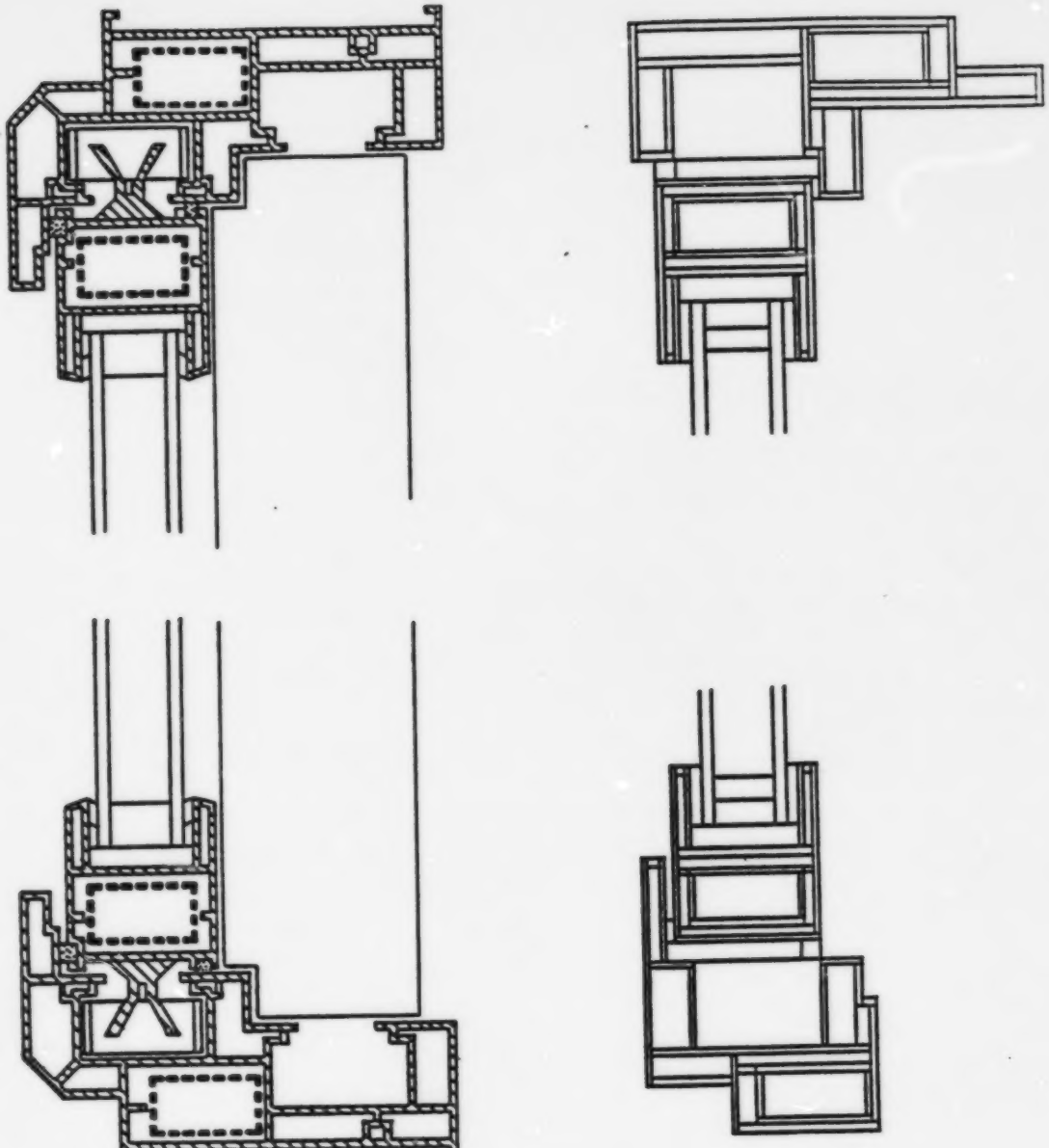
Cadre de fenêtre coulissante en aluminium avec coupure thermique de 20 mm (coupe verticale) - S2



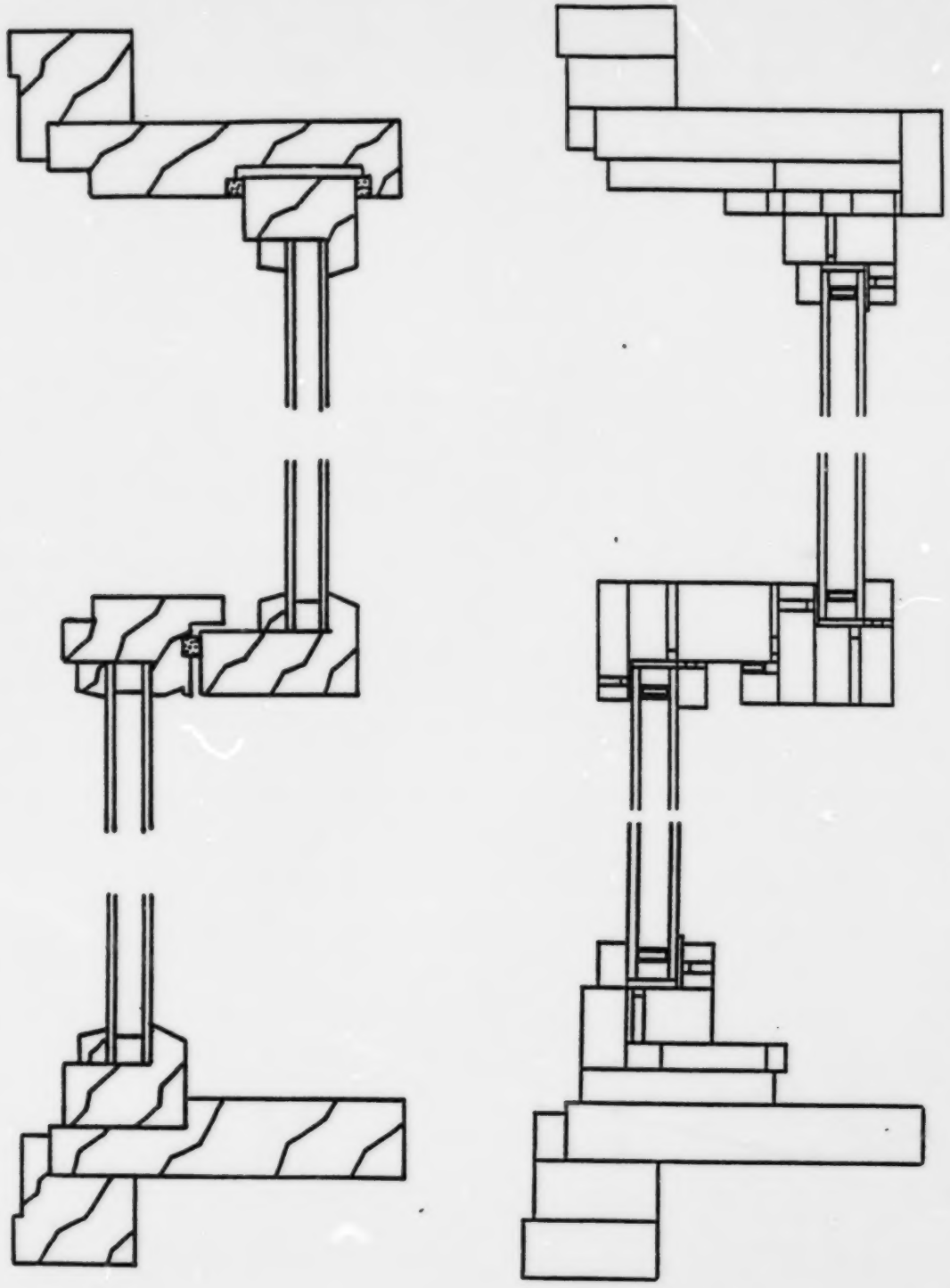
Cadre de fenêtre coulissante en fibre de verre - S3



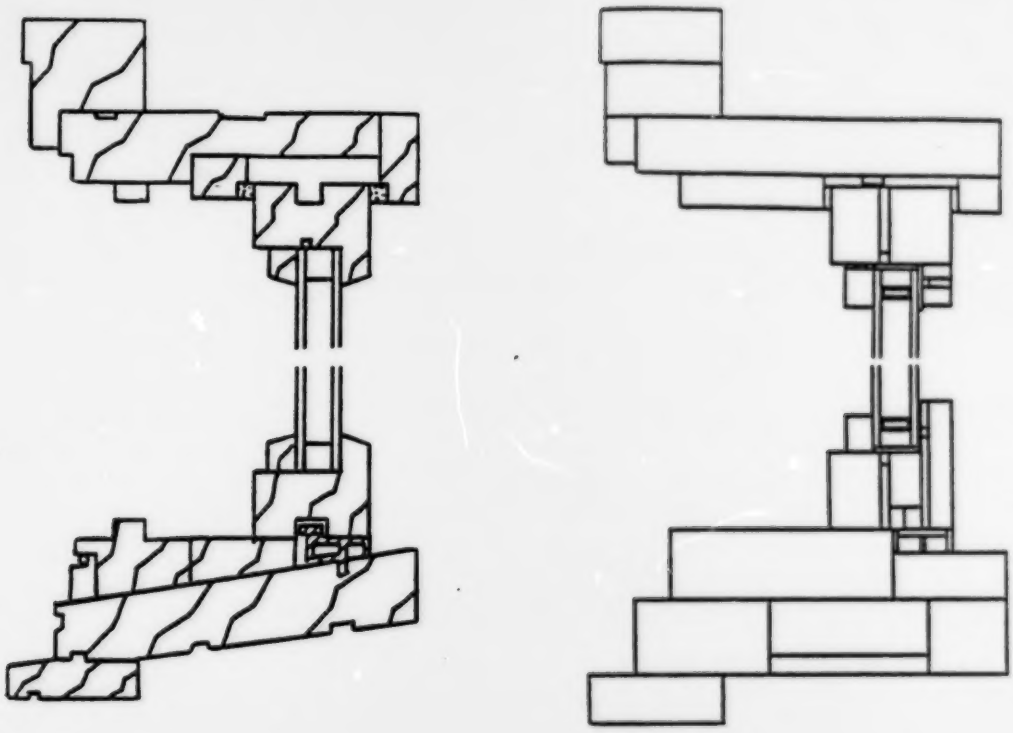
Cadre de fenêtre coulissante en vinyle (renforcé ou non) (coupe horizontale) - S4



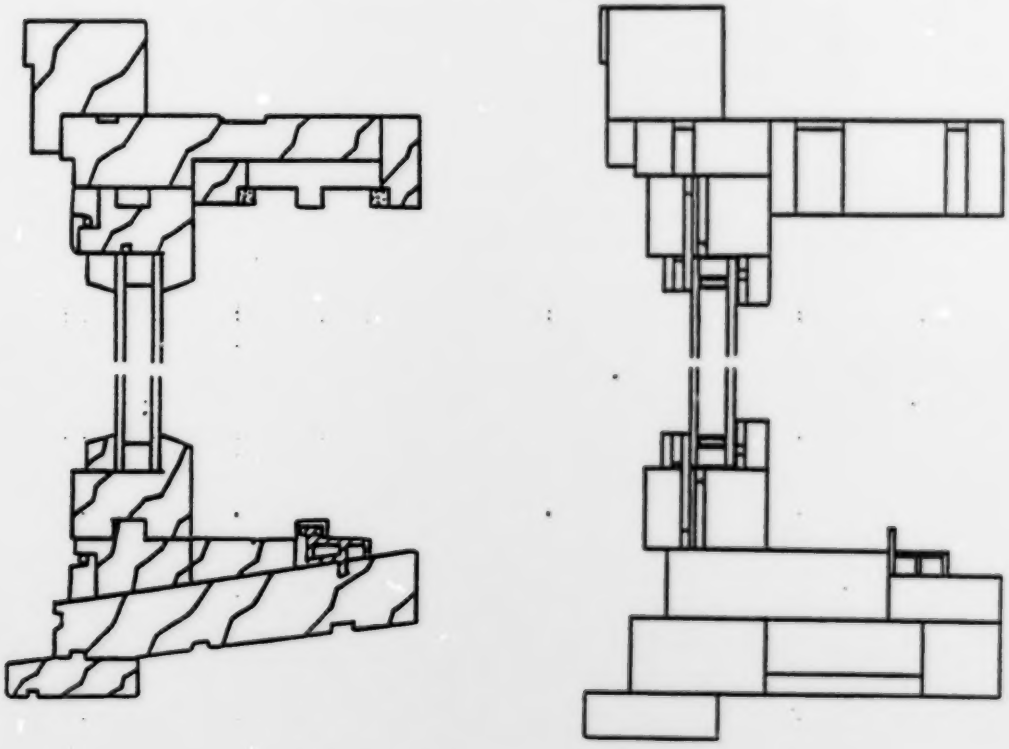
Cadre de fenêtre coulissante en vinyle (renforcé ou non) (coupe verticale) - S4



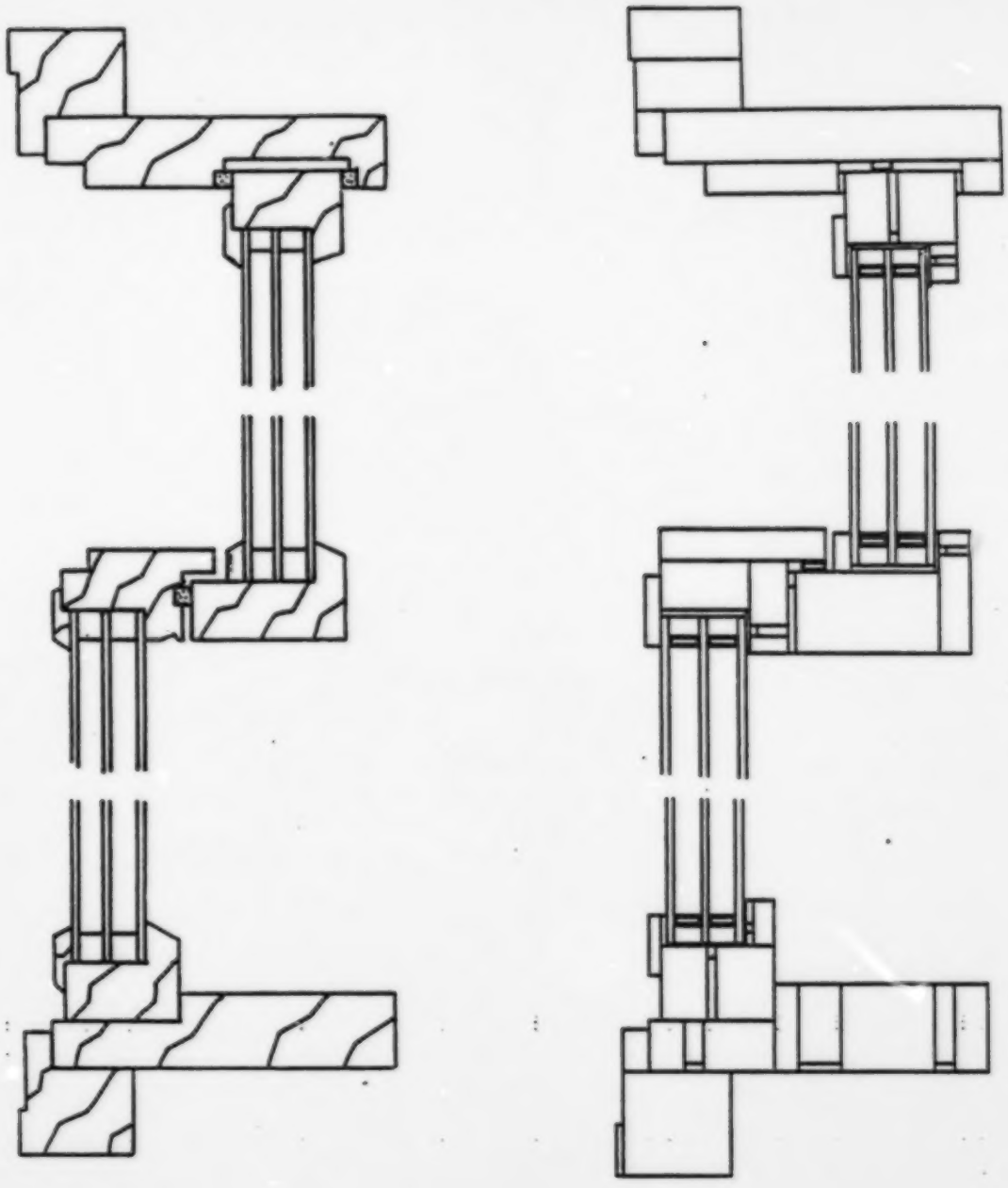
Cadre de fenêtre coulissante en bois à double vitrage (coupe horizontale) - S5



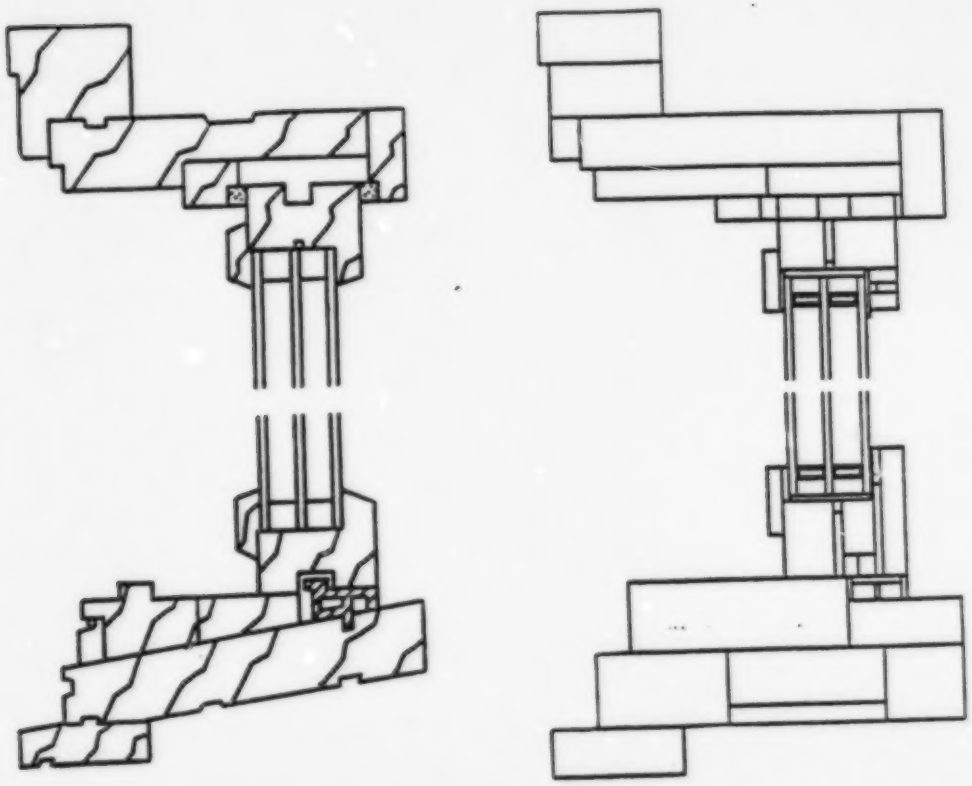
Cadre de fenêtre coulissante en bois à double vitrage (coupe verticale 1) - S5



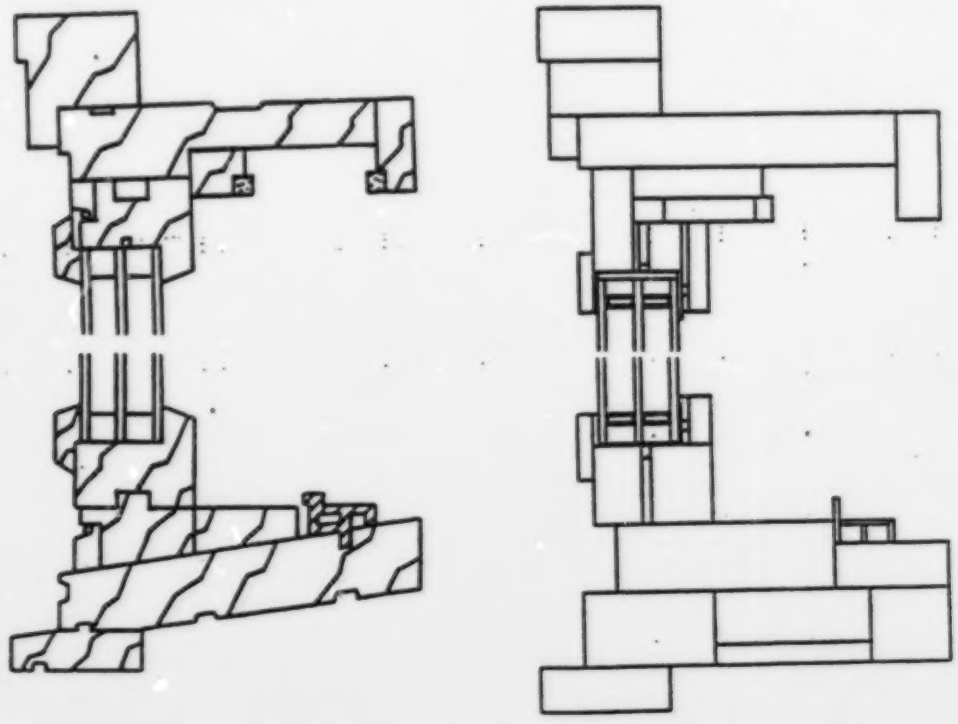
Cadre de fenêtre coulissante en bois à double vitrage (coupe verticale 2) - S5



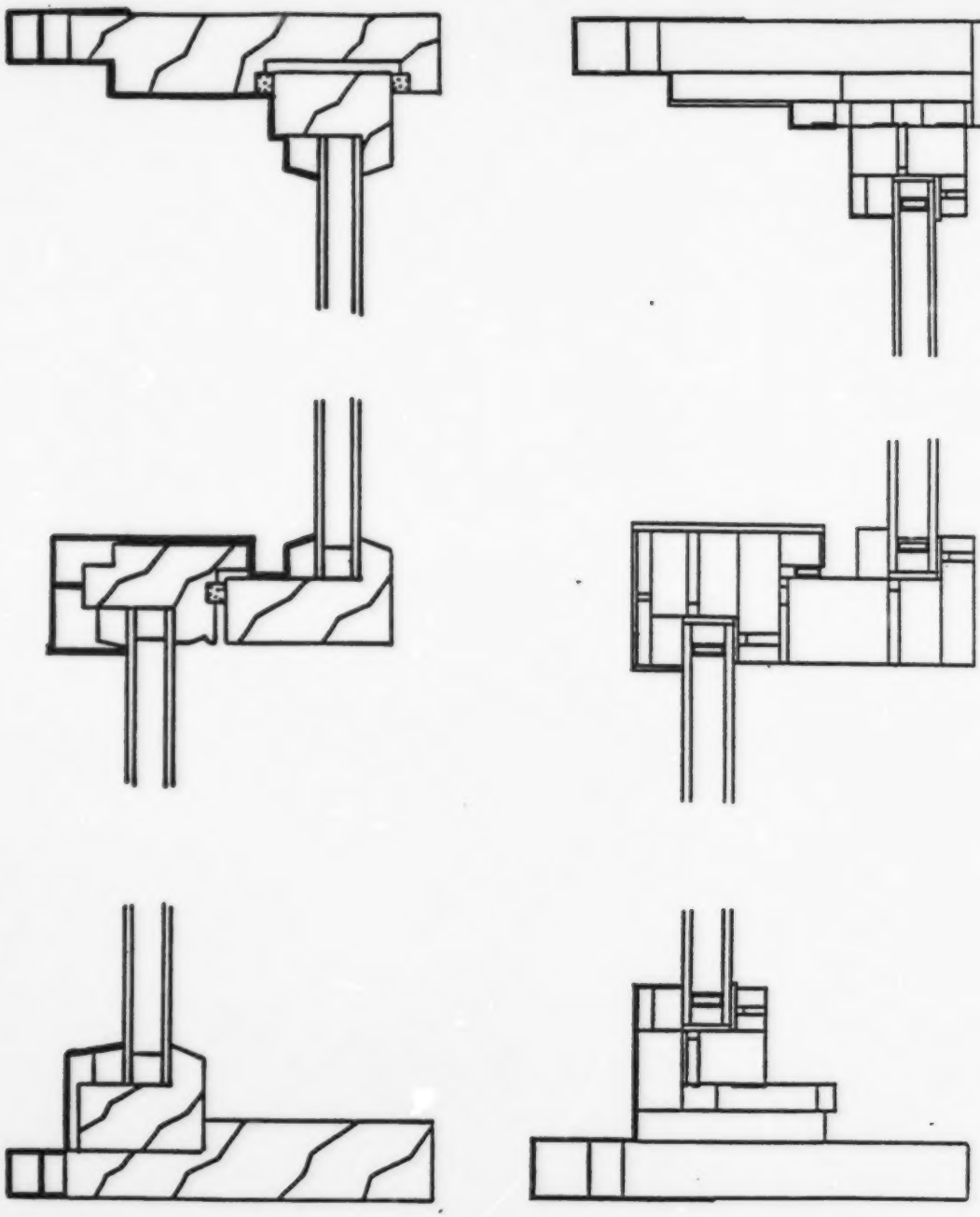
Cadre de fenêtre coulissante en bois à triple vitrage (coupe horizontale) - S6



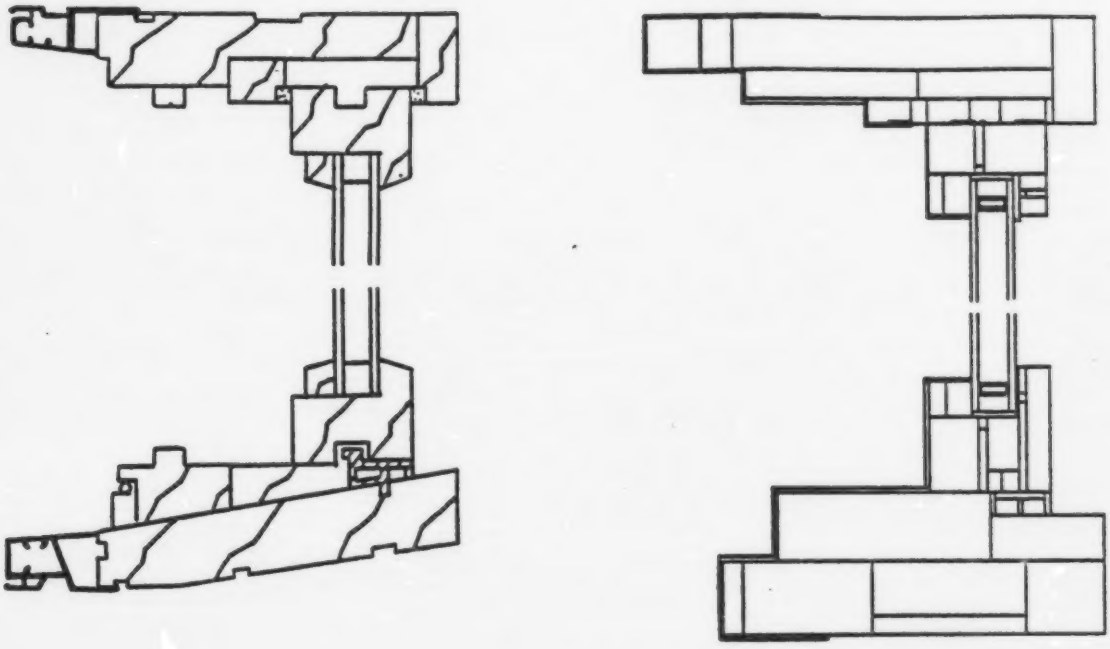
Cadre de fenêtre coulissante en bois à triple vitrage (coupe verticale 1) - S6



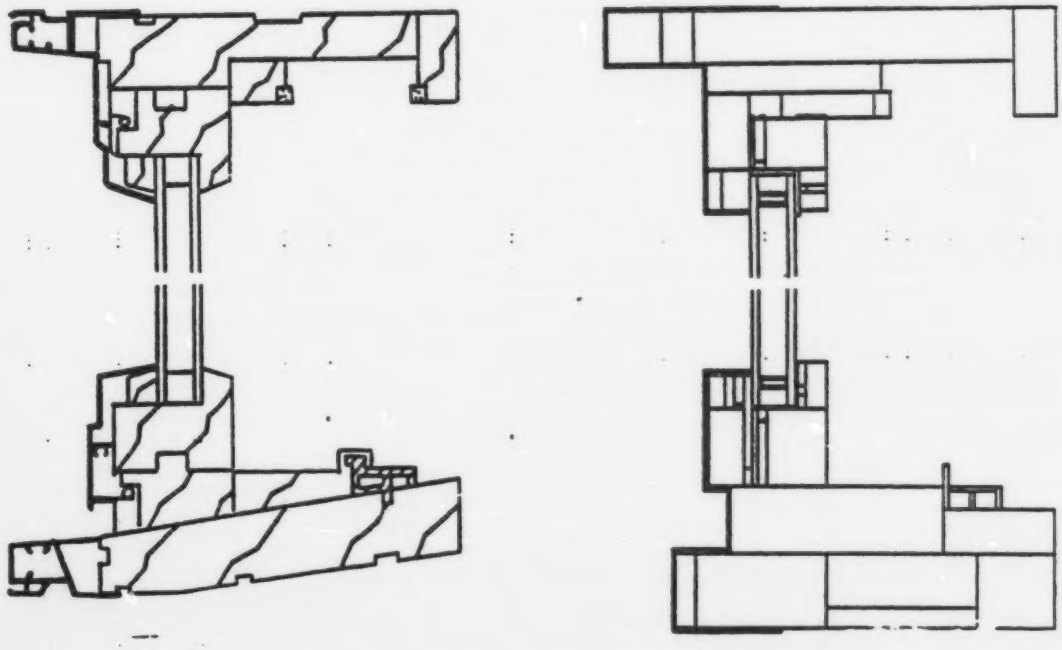
Cadre de fenêtre coulissante en bois à triple vitrage (coupe verticale 2) - S6



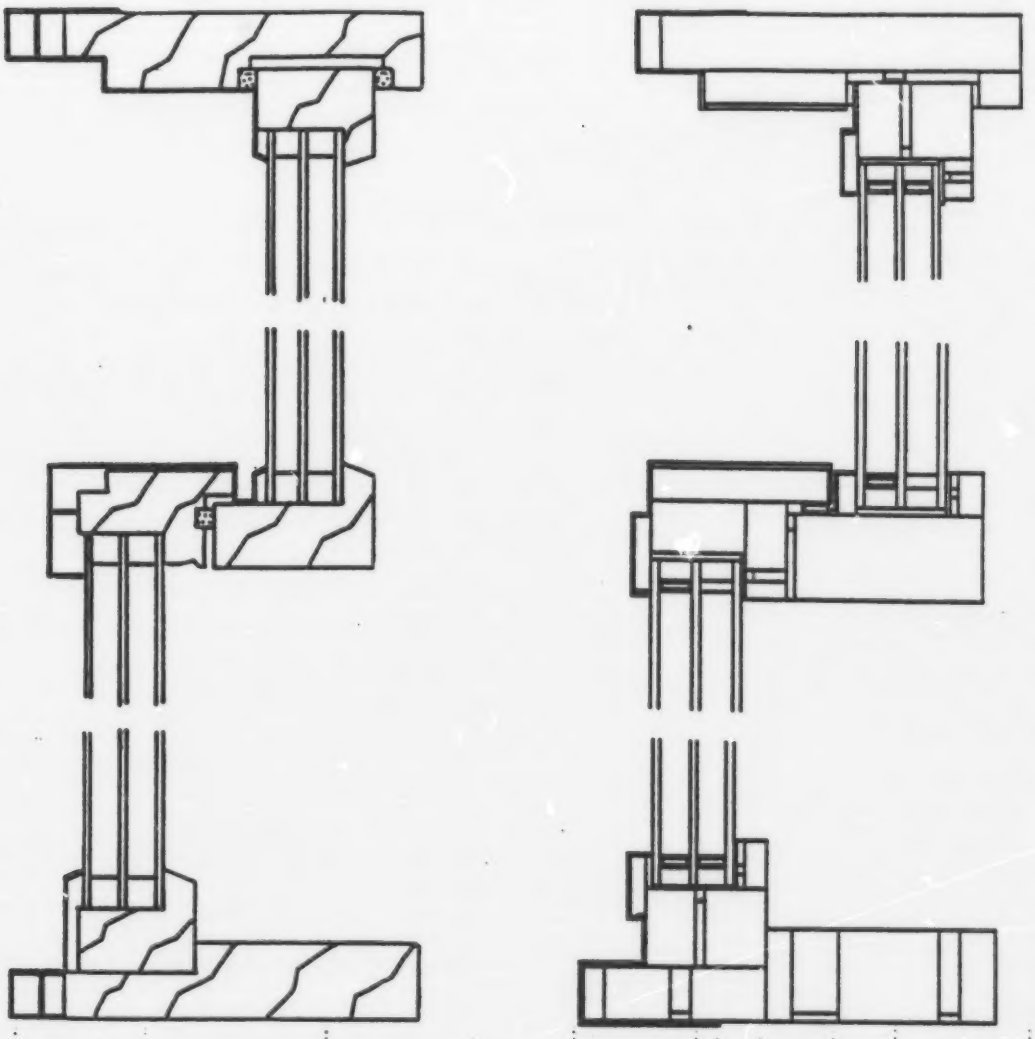
Cadre de fenêtre coulissante en bois revêtu d'aluminium à double vitrage (coupe horizontale) - S7



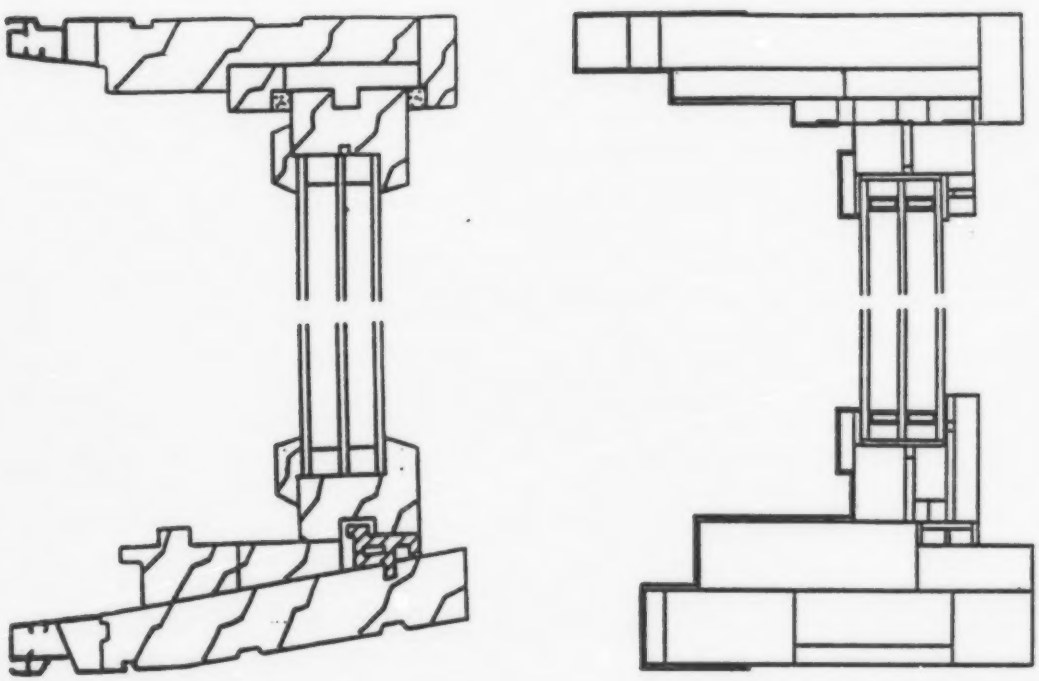
Cadre de fenêtre coulissante en bois revêtu d'aluminium à double vitrage (coupe verticale 1) - S7



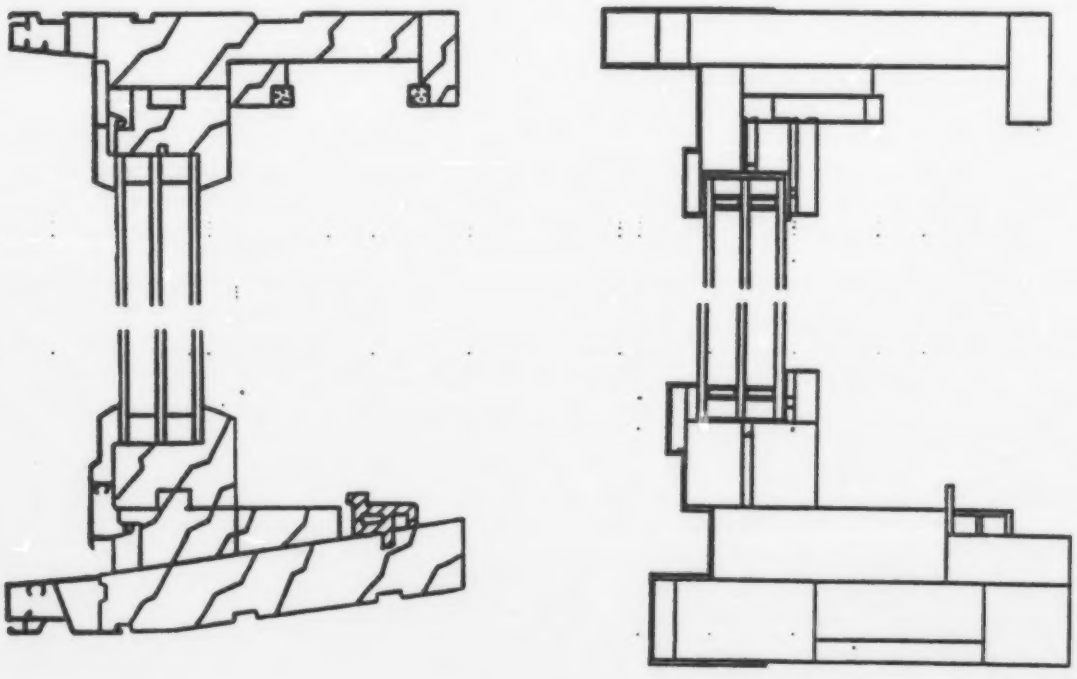
Cadre de fenêtre coulissante en bois revêtu d'aluminium à double vitrage (coupe verticale 2) - S7



Cadre de fenêtre coulissante en bois revêtu d'aluminium à triple vitrage (coupe horizontale) - S8



Cadre de fenêtre coulissante en bois revêtu d'aluminium à triple vitrage (coupe verticale 1) - S8



Cadre de fenêtre coulissante en bois revêtu d'aluminium à triple vitrage (coupe verticale 2) - S8

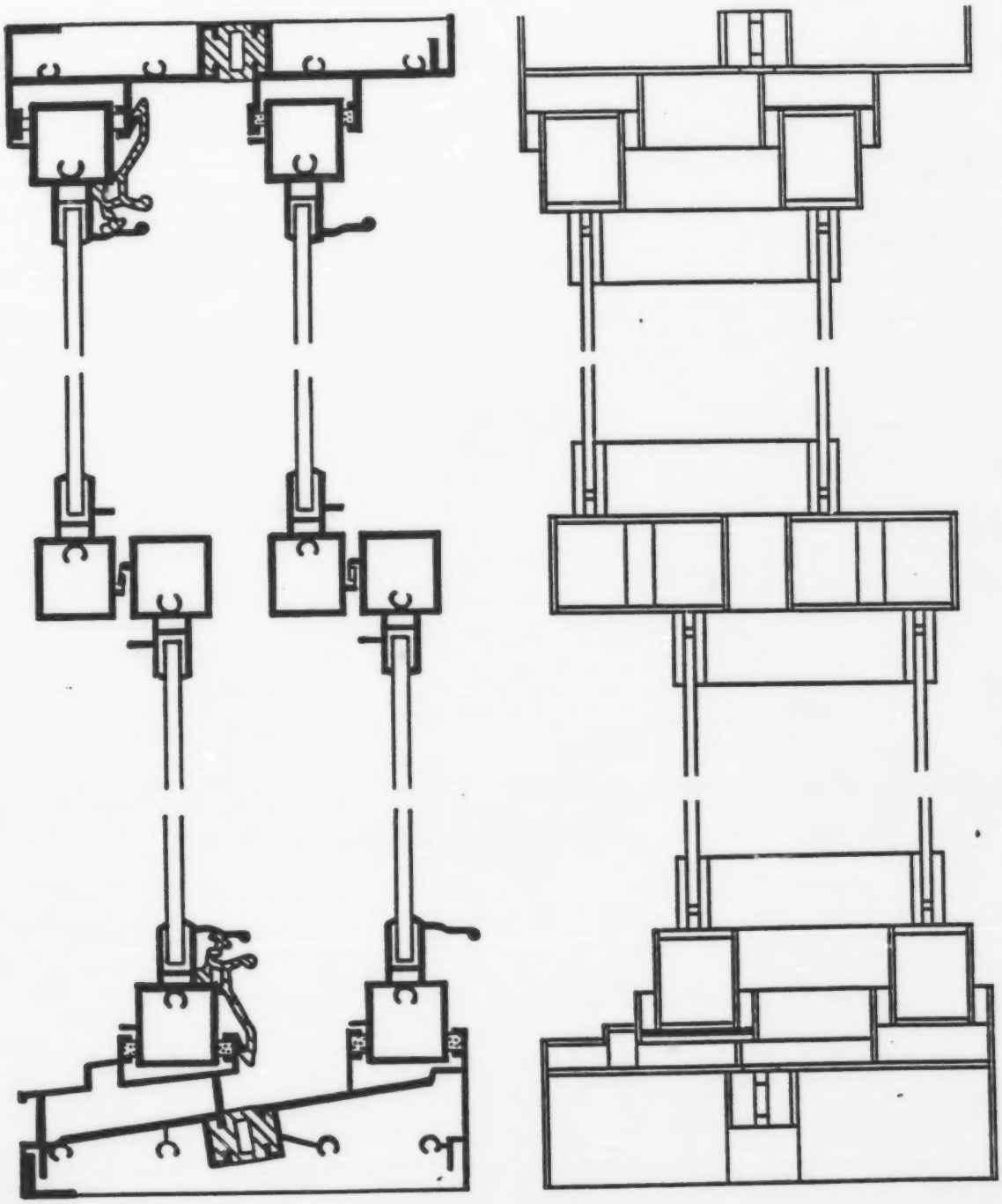
ANNEXE B.4 : COUPES DE FENETRES COULISSANTES A CHASSIS SANS TRAVERSES

Remarques :

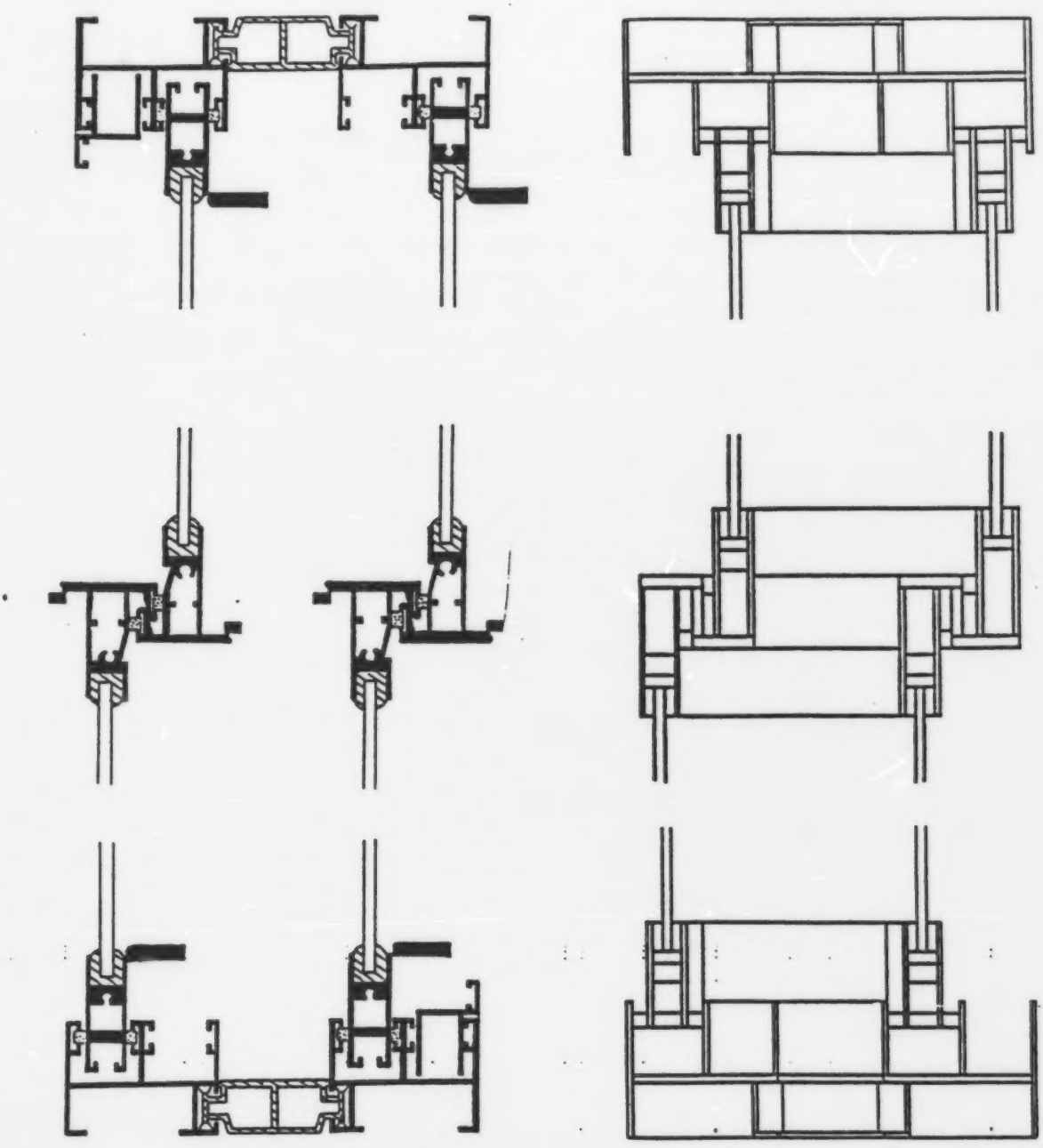
1) Coupe réelle à gauche, représentation FRAME à droite.

2) Toutes les fenêtres illustrées coulissent horizontalement.

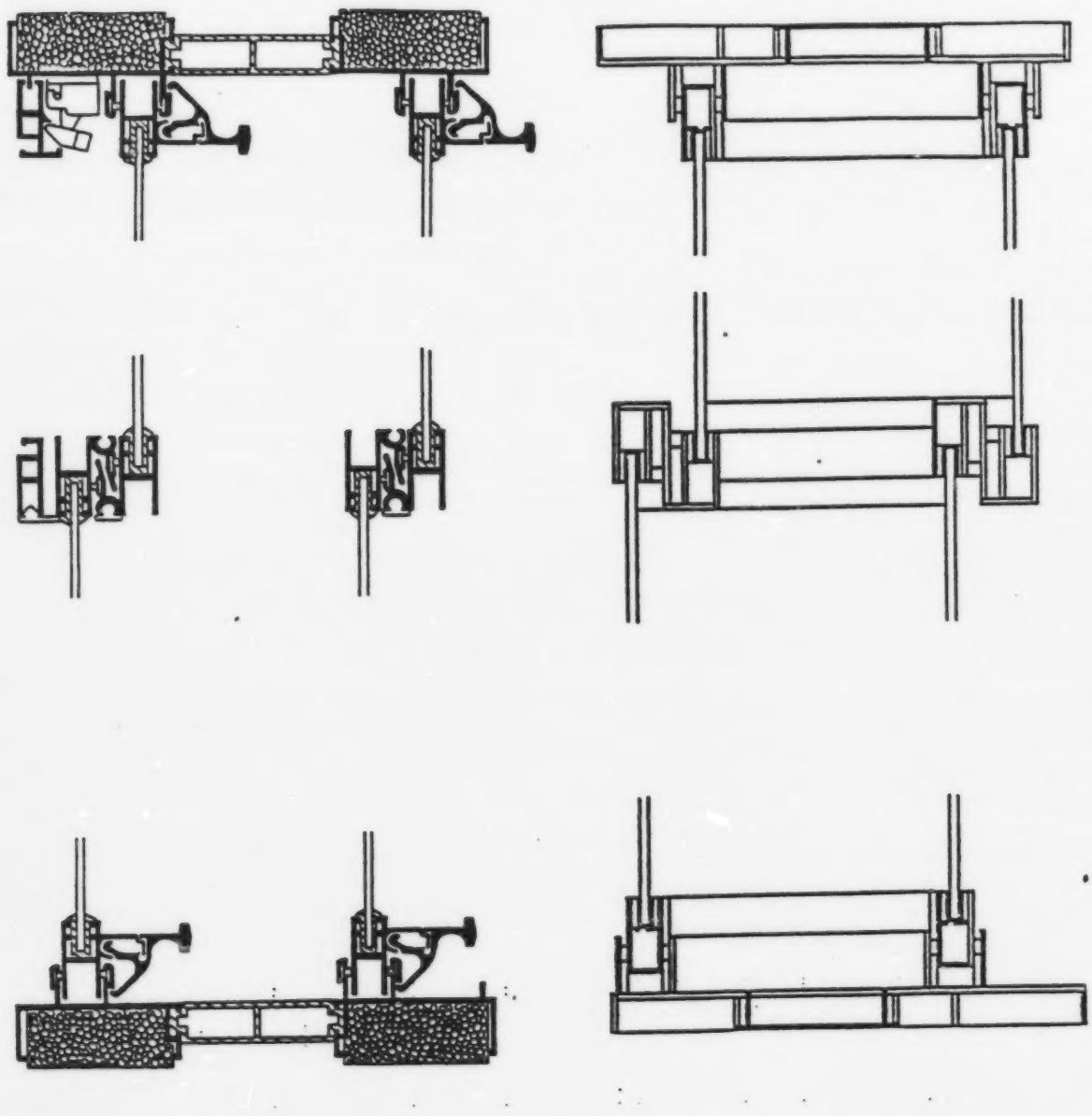
3) Légende des matériaux :



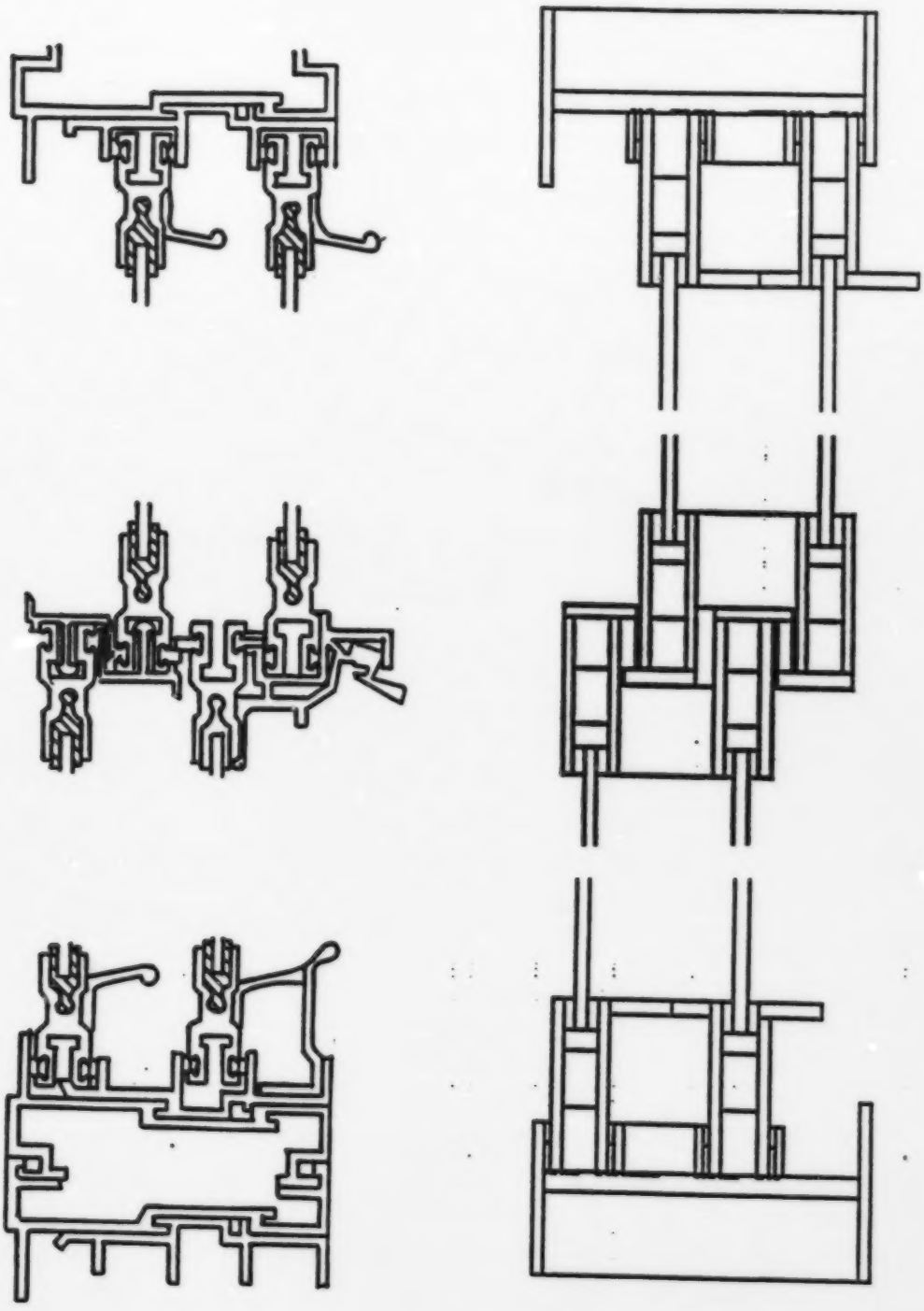
Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en aluminium avec coupure thermique de 10 mm (coupe horizontale) - S9 (même coupe que pour le cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en aluminium sans coupure thermique)



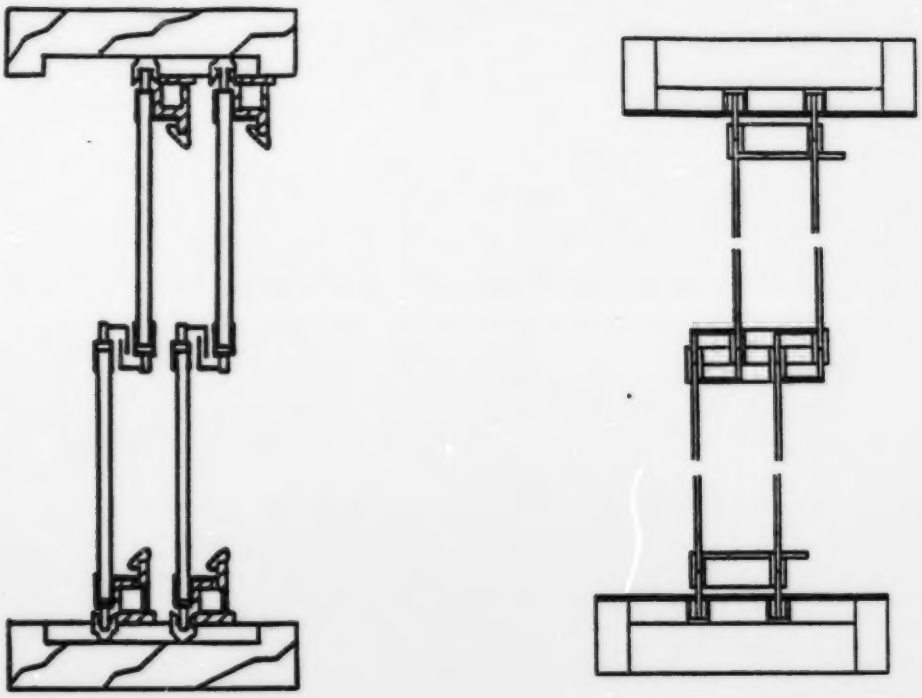
Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en aluminium avec coupure thermique de 35 mm (coupe horizontale) - S10



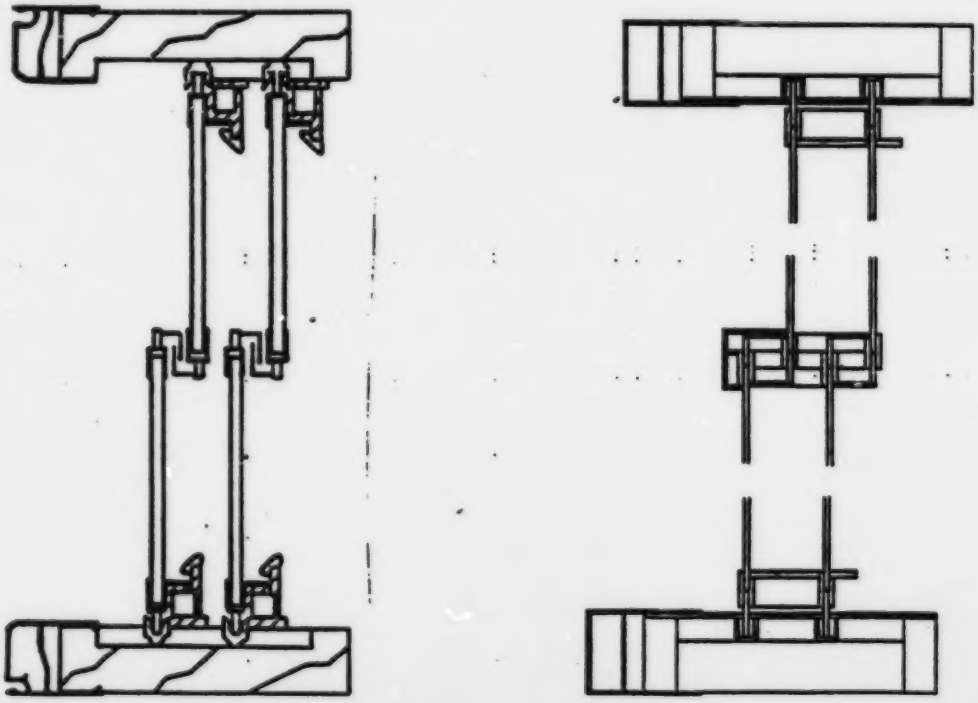
Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en aluminium avec coupure thermique de 50 mm (coupe horizontale) - S11



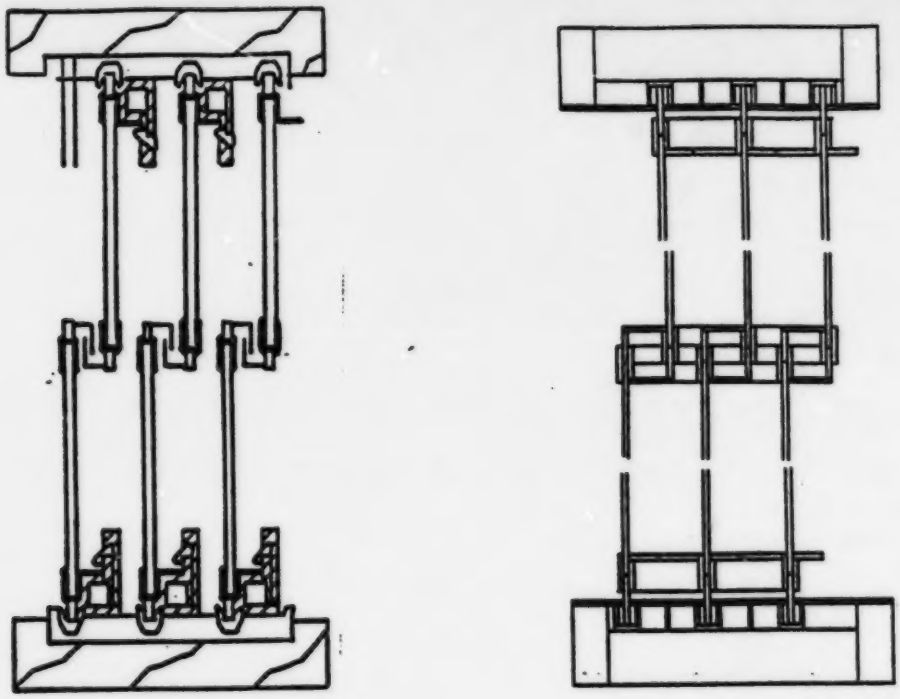
Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en fibre de verre (coupe horizontale) - S12



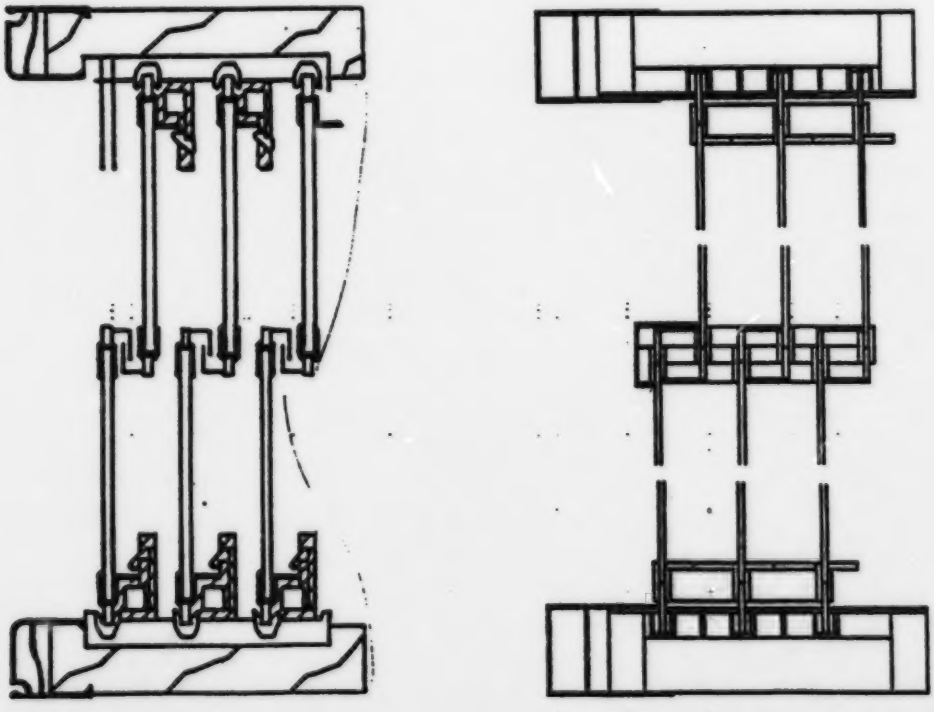
Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en bois à double vitrage (coupe horizontale) - S13



Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en bois revêtu d'aluminium à double vitrage (coupe horizontale) -S15



Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en bois à triple vitrage (coupe horizontale) - S14



Cadre de fenêtre coulissante à châssis sans traverses en bois revêtu d'aluminium à triple vitrage (coupe horizontale) - S16

ANNEXE C

FEUILLE DE CALCUL DE LA VALEUR U ET DU CGS GLOBAUX DES FENÊTRES

ÉTAPE 1 VALEUR U DE LA FENÊTRE

I Valeur U du centre du vitrage selon le tableau 5

Valeur U du centre du vitrage _____

II Constantes de valeur U de la bordure du vitrage selon le tableau 6

A = _____, B = _____, C = _____

$U_{eg} = A + B * U_{cg} + C * U_{cg}^2$ = _____

III Valeur U du cadre selon les tableaux 8 à 11

Intercalaire métallique $U_{métal}$ _____

Intercalaire isolant U_{isol} _____

Intercalaire de verre $0.50 * U_{métal} + 0.50 * U_{isol}$ = _____

Interc. métal. + isol. $0.15 * U_{métal} + 0.85 * U_{isol}$ = _____

IV Fractions éléments

Hauteur du cadre et largeur et hauteur de la fenêtre [mm]

Largeur de la fenêtre, W = _____, Hauteur, H = _____

Hauteur du cadre = _____, selon les tableaux 8 à 11

Fraction cadre

Fenêtres fixes et à charnières

$F_{fr} = [(W * H) - (W - 2 * H_{fr}) * (H - 2 * H_{fr})] / (W * H)$ _____

Fenêtres coulissant verticalement

$F_{fr} = [(W * (H/2)) - (W - 2 * H_{fr}) * ((H/2) - 2 * H_{fr})] / (W * (H/2)) * H)$ _____

Fenêtres coulissant horizontalement

$F_{fr} = [((W/2) * H) - ((W/2) - 2 * H_{fr}) * (H - 2 * H_{fr})] / ((W/2) * H)$ _____

Fraction centre du vitrage

Fenêtres fixes et à charnières

$F_{cg} = [(W - 2 * H_{fr} - 127) * (H - 2 * H_{fr} - 127)] / (W * H)$ _____

Fenêtres coulissant verticalement

$F_{cg} = [(W - 2 * H_{fr} - 127) * ((H/2) - 2 * H_{fr} - 127)] / (W * (H/2))$ _____

Fenêtres coulissant horizontalement

$F_{cg} = [((W/2) - 2 * H_{fr} - 127) * (H - 2 * H_{fr} - 127)] / ((W/2) * H)$ _____

Fraction bordure du vitrage

$F_{eg} = 1 - F_{cg} - F_{fr}$ _____

V Valeur U de la fenêtre

$U_{total} = U_{cg} * F_{cg} + U_{eg} * F_{eg} + U_{fr} * F_{fr}$ _____

ÉTAPE 2 CALCUL DU CGS

I CGS du centre du vitrage selon le tableau 14

CGS_{cg} _____

II CGS du cadre

$CGS_{fr} = 0.015 * 0.9 * U_{fr}$ = _____

IIJ CGS de la fenêtre

$CGS_{total} = CGS_{cg} * (F_{cg} + F_{eg}) + CGS_{fr} * F_{fr}$ = _____